CONCEPTOS Y REFERENCIAS EN

TEORÍA DE LA INFORMACIÓN Y LAS TELECOMUNICACIONES:

ASPECTOS DIGITALES

Fernando Vélez Varela
Autor

Ciro Antonio Dussan Clavijo
Yesid Eugenio Santafé Ramón
Coautores

VIGILADA MINEDUCACIÓN
USC UNIVERSIDAD SANTIAGO DE CALI
EDITORIAL

Cita este libro:

Vélez Varela, F. (Ed.), Dussán Clavijo, C. A., & Santafé Ramón, Y. E. (2024). *Conceptos y referencias en teoría de la información y las telecomunicaciones: Aspectos digitales*. Editorial Universidad Santiago de Cali.

Palabras Claves / Keywords:

Telecomunicaciones, Sistema, Digital, Banda Base, Código, Codificación, Binario, Ancho de Banda

Telecommunications, System, Digital, Base Band, Code, Codification, Binary, Bandwitdh

Contenido relacionado:
https://investigaciones.usc.edu.co/

TEORÍA DE LA INFORMACIÓN Y LAS TELECOMUNICACIONES:

ASPECTOS DIGITALES

Concepts and References in Information Theory and Telecommunications: Digital Aspects

Autor

Fernando Vélez Varela

Coautores:

Ciro Antonio Dussán Clavijo

Yesid Eugenio Santafé Ramón

USC
UNIVERSIDAD SANTIAGO DE CALI
EDITORIAL

Conceptos y Referencias en Teoría de la Información y las Telecomunicaciones. Aspectos Digitales / Fernando Vélez Varela [Editor científico]; Ciro Antonio Dussán Clavijo, Yesid Eugenio Santafé Ramón. – Cali: Universidad Santiago de Cali, 2024.

288 páginas: gráficos; 24 cm.

Incluye índice

ISBN: 978-628-7770-27-0 **ISBN (Digital):** 978-628-7770-28-7

1. Telecomunicaciones 2. Codificación 3. Binario 4. Ancho de Banda I. Juan Portocarrero Cuero II. Saul Rick Fernández Hurtado III. Universidad Santiago de Cali. Facultad de Ingeniería.

SCDD 621.382 ed. 23 CO-CaUSC

JRGB/2025

USC
UNIVERSIDAD SANTIAGO DE CALI
EDITORIAL

Conceptos y Referencias en Teoría de la Información y las Telecomunicaciones. Aspectos Digitales

Edición 100 ejemplares
Cali, Colombia-2024

Proceso de arbitraje doble ciego:
"Double blind" peer-review.

Recepción/Submission:
Octubre 2023 (October) de 2023.

Evaluación de contenidos/
Peer-review outcome:
Febrero (February) de 2024.

Correcciones de autor/
Improved version submission:
Julio (July) de 2024.

Aprobación/Acceptance:
Agosto (August) de 2024.

TABLA DE CONTENIDO

Table of Content

LISTA DE FIGURAS

List of figures

RESUMEN

Abstract

Este libro se encarga de desarrollar los conceptos y referencias en teoría de la Información y las Telecomunicaciones, explicando lo básico para comprender el comportamiento de las señales en el ámbito continuo y analógico, las cuales se adaptarán de forma extrapolada a los eventos de la transmisión de voz, datos o imágenes, además se hace énfasis en las técnicas y tecnologías que se usan en establecimiento de los esquemas de manejo de sistemas transmisores y receptores en red, para disponer el uso de señales y datos, lo cual se dispone como una referencia obligada para quienes requieran introducirse en el ambiente dinámico de la transferencia de la información. Esto se explica de forma clara y sencilla, y además de manera objetiva, apoyándose en un manejo metodológico que se respalda en un recorrido experimental que tiene el autor acumulado en su práctica profesional como intérprete del uso de las tecnologías, además de la trayectoria docente de más de 20 años de trabajo. Este compendio de conceptos abarca de forma completa los conocimientos primarios necesarios en Telecomunicaciones, lo cual se estructura en doce capítulos, en los cuales se desarrollan los siguientes contenidos: Clasificación de Señales; las Unidades de Medida; la Calidad de Transmisión; El Ruido; la Relación Señal a Ruido; los conceptos de referencia en la Teoría de las Telecomunicaciones; transmisión en amplitud modulada; recepción en amplitud modulada; sistemas de comunicaciones de banda lateral única; modulaciones angulares; explicaciones adicionales; modulaciones angulares; modulación en frecuencia; como también los aspectos básicos iniciales de las comunicaciones digitales.

DEDICATORIA

Dedicatory

Con profunda gratitud y satisfacción, dedico estas palabras en un momento que representa un hito significativo en mi vida profesional. La culminación de esta obra no solo simboliza años de esfuerzo, estudio y trabajo, sino también el compromiso firme que he asumido con el conocimiento, la enseñanza y el aporte a la formación de nuevas generaciones en el campo de la ingeniería y las telecomunicaciones.

Quiero agradecer de manera especial a mi amigo, colega y compañero de camino durante más de dos décadas, el Ingeniero Fernando Vélez, autor principal de este libro. Su visión, entrega y pasión por el saber han sido el motor que impulsó este proyecto. Gracias, Fernando, por liderar con tanto empeño esta obra y por invitarme a participar desde mi experiencia profesional. Ha sido un privilegio y un honor acompañarte en este esfuerzo intelectual y académico.

También dedico este logro a mi familia, fuente inagotable de apoyo y motivación. A mi esposa, Ángela María, por su amor incondicional, por caminar siempre a mi lado, comprender mis silencios y alentarme en los momentos de mayor exigencia. A mis hijas, Camila, Valeria y Sofía, quienes representan la alegría de mi vida y el propósito profundo de cada paso que doy; son, sin duda, la razón por la cual perseveró y me esfuerzo cada día.

A mi madre Cecilia, a quien recuerdo con amor y gratitud, sé que me acompaña desde el cielo, iluminando mi camino con su espíritu noble y su legado de bondad. Y a mi padre, Ciro Dussán, ejemplo de sabiduría, templanza y dignidad, quien ha sido faro y bastión en mi vida, y cuyo consejo sigue guiando mis decisiones.

Este logro me inspira a seguir contribuyendo activamente a la academia, a continuar compartiendo conocimientos, construyendo puentes entre la teoría y la práctica, y formando profesionales íntegros y comprometidos con el futuro de nuestra sociedad. Que esta obra sea

solo un paso más en el camino que he elegido: el de enseñar, aprender y servir.

Ciro Antonio Dussán Clavijo

AGRADECIMIENTOS

Acknowledgments

A la Universidad Santiago de Cali, y a la Universidad Libre Seccional Cali, por todo su apoyo.
A Luis Felipe Cadena Guevara por tanta enseñanza, y a los demás maestros de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, porque es infinito el agradecimiento.
A las estudiantes Leidy Ortega Solarte y Yudi Liseth Álvarez Álvarez, por su colaboración.
Fernando Vélez Varela

Doy las gracias a mi amigo, colega y compañero de trabajo de más de 20 años, el Ingeniero Fernando Vélez autor principal de este libro, quien con su empeño y dedicación al conocimiento ha dirigido esta obra, gracias por permitirme colaborar desde mi experiencia en el mundo de las telecomunicaciones.
En segundo lugar, a mi familia, a mi esposa Angela María, quien me acompaña y apoya con su amor, a mis hijas Camila, Valeria y Sofia quienes son el motor que impulsa todas mis acciones y por quienes lucho día a día. A mi recordada madre Cecilia quien desde el cielo sé que me cuida y al maestro que ha sido mi padre Ciro Dussán que es un gran bastión y faro en mi camino.
Ciro Antonio Dussán Clavijo

EPÍGRAFE

Preface

Hoy en día, saber mucho no equivale a ser inteligente. La inteligencia no radica únicamente en la acumulación de información, sino en la capacidad de discernir con madurez. Nos diferenciamos no solo por el conocimiento que adquirimos, sino por la forma en que lo interpretamos y aplicamos...

La felicidad rara vez se alcanza mediante grandes golpes de suerte. Alguien solía decirme que siempre tuviera fe, incluso cuando esos momentos extraordinarios son escasos. La verdad es que la plenitud se construye con todas esas pequeñas cosas que suceden a diario.

La resiliencia otorga al ser humano la capacidad de enfrentar las adversidades y, con empoderamiento, transformar lo negativo en una fuente de crecimiento y fortaleza. Una persona resiliente comprende que es el arquitecto de su propia alegría y destino.

PRÓLOGO

Preface

En la era digital, la influencia de las telecomunicaciones en la vida moderna es innegable. A lo largo de los últimos años, especialmente en la última década, las tecnologías ligadas a la conectividad han evolucionado de manera exponencial, alcanzando niveles de madurez que han redefinido la forma en que interactuamos con el mundo. En la actualidad, las telecomunicaciones no solo son una disciplina tecnológica fundamental, sino que también se han convertido en el eje sobre el cual gira la sociedad digital.

Las telecomunicaciones digitales tienen como objetivo mejorar la calidad de vida y optimizar procesos en múltiples sectores, desde la industria hasta la vida cotidiana. Su impacto se debe, en gran medida, a la integración de la inteligencia artificial, la computación en la nube, el Internet de las Cosas (IoT) y las redes de alta velocidad como el 5G. Estas tecnologías han potenciado la conectividad ubicua, permitiendo una transmisión de datos más eficiente, segura y rápida.

Uno de los fenómenos más significativos en este ámbito es la convergencia digital, que ha transformado la manera en que se estructuran y utilizan las redes de comunicación. La integración de Internet con sistemas avanzados de procesamiento de datos ha facilitado el desarrollo de plataformas inteligentes que automatizan procesos, mejoran la seguridad y permiten la toma de decisiones basada en datos en tiempo real. Esta transformación se refleja en la conectividad masiva de dispositivos personales, hogares inteligentes y ciudades interconectadas.

La creciente digitalización de las telecomunicaciones ha impulsado la necesidad de una formación continua en este campo. La gestión eficiente de la información y el conocimiento es clave en industrias

como la educación, la salud, el comercio electrónico, el transporte inteligente, la ciberseguridad, las finanzas digitales y la administración gubernamental. La implementación de redes definidas por software (SDN), la virtualización de funciones de red (NFV) y la adopción de arquitecturas de computación distribuida han redefinido los modelos de operación y servicio en todos estos sectores.

Este texto resalta el papel esencial de la educación digital como pilar para la evolución de una sociedad moderna e interconectada. En este contexto, se presenta como una guía para comprender los fundamentos de las telecomunicaciones digitales, proporcionando a los lectores los conocimientos esenciales para navegar y contribuir en un entorno tecnológico en constante transformación.

Ing. Jose Luis Arciniegas Herrera
Dr. Universidad del Cauca

INTRODUCCIÓN

Introduction

Indudablemente, si hay un campo tecnológico que ha experimentado avances significativos a lo largo de la historia, ese es el de las telecomunicaciones. A través de los tiempos, se ha sido testigo de la evolución de este ámbito, desde sus raíces primordiales en la codificación de mensajes mediante señales de humo y fuego, pasando por etapas como el correo postal, hasta el surgimiento del telégrafo, la telefonía, la radio, la televisión y, en la actualidad, la omnipresencia de Internet como un medio de convergencia integral.

Este persistente impulso por la comunicación surge de la necesidad humana de reducir las limitaciones geográficas. Históricamente, circunstancias sociales y necesidades apremiantes han impulsado la búsqueda constante de métodos precisos para satisfacer esta necesidad tecnológica. En el marco de la teoría de las telecomunicaciones, su función fundamental radica en transferir paquetes de información de un punto a otro. Si bien resulta sencillo cuando tanto el emisor como el receptor están físicamente en el mismo lugar, el desafío se intensifica cuando la distancia es un factor y se requiere trasladar grandes volúmenes de información en tiempos limitados. En esta coyuntura, la tecnología y el hardware entran en juego como aliados esenciales para facilitar el proceso de comunicación.

Así es como nacen las telecomunicaciones, donde la comunicación máquina a máquina toma el centro del escenario. Los diálogos apoyados por entidades mecánicas y electrónicas se convierten en el método idóneo para llevar a cabo este proceso de comunicación, mediante el envío de señales generadas electrónicamente. La elección de la electrónica como acompañante se basa en su capacidad para gestionar, detectar y almacenar señales, lo que posibilita transmitir grandes cantidades de información en lapsos cortos. De esta manera, las telecomunicaciones se perfilan como la convergencia de múltiples

disciplinas, donde se definen señales con diversos estados que representan la esencia de las cosas. Estos estados cuantificados, en combinación con las propiedades de las señales, encapsulan la información que las máquinas y dispositivos intercambian en el proceso de las telecomunicaciones.

En esencia, las telecomunicaciones abarcan una vasta área de desarrollo que converge en la transmisión y recepción de información utilizando medios que manipulan señales electromagnéticas. El objetivo es transportar contenido en forma de audio, vídeo o texto, o combinaciones de los tres. En el entorno actual, impulsado por tecnologías en constante evolución, el concepto de circuito de telecomunicaciones cobra relevancia al delinearse la interacción entre los extremos, los emisores y receptores, a través de intercambios de información. Adentrarse en este concepto es fundamental para comprender la teoría de las telecomunicaciones y su aplicación en un mundo cada vez más interconectado.

CAPÍTULO 1

DE SEÑALES ANALÓGICAS A DIGITALES

From Analog to Digital Signals

Resumen

La conversión de analógico a digital es el proceso de copiar una señal analógica a una señal digital, que básicamente se lleva a cabo cuando se realizan mediciones de amplitud periódicamente (por ejemplo, voltaje proveniente de un convertidor, como micrófonos, cuando este es para grabar sonido, o cuando detecta un señal en movimiento al registrar vibraciones para un sismómetro o sonda en medición oscilométrica para medir cualquier nivel de voltaje variable de interés en la señal; el propósito de esto es facilitar el procesamiento posterior, como la codificación y la comprensión, y hacer que la señal digital resultante sea más fuerte y libre de interferencias así como de otros tipos de ruido a los que la señal analógica es más sensible Este procedimiento consiste en realizar procedimientos de redondeo de los valores resultantes, los cuales son ajustados por valores para un conjunto finito de combinaciones de niveles de tensión preestablecidos, denominados niveles de cuantificación y, por lo tanto, almacenarlos como números enteros en cualquier tipo de esquema de almacenamiento de medios.

Palaras claves: Conversión Analógico-Digital, Procesamiento de Señales, Voltaje, Señal, Ruido.

Abstract

Analog-to-digital conversion is the process of copying an analog signal to a digital signal, which is basically carried out when amplitude measu-

rements are made periodically (for example, voltage coming from a converter, such as microphones, when this is for recording sound, or when detecting a moving signal by recording vibrations for a seismometer or probe in oscillometric measurement to measure any variable voltage level of interest in the signal; the purpose of this is to facilitate further processing such as encoding and understanding, and make the resulting digital signal stronger and free from interference as well as other types of noise to which the analog signal is more sensitive. This procedure consists of performing rounding procedures on the resulting values, which are adjusted by values to a finite set of combinations of preset voltage levels, called quantization levels, and therefore store them as integers in any kind of media storage scheme.

Keywords: *Analog-Digital Conversion, Signal Processing, Voltage, Signal, Noise.*

1.1. Conversión de Señal Analógica a Digital

1.1.1. Señal Analógica

Esta es aquella que tiene un comportamiento continuo en el tiempo, y existe en todo momento. Además, es continua en amplitud, eso quiere decir que existe en cualquier valor de amplitud, por ende, tiene un número infinito de valores de amplitud. (Carlson, 2007)

1.1.2. Señal Digital

Esta es una señal que se caracteriza por ser discreta en el tiempo: Sólo existe en ciertos valores de éste; además es discreta en amplitud, eso quiere decir que sólo existe en ciertos valores de esta, lo que implica que puede definir y además tiene un número finito de valores de amplitud. (Stremler, 2008; Tomasi, 2003; Rashed, 2023)

1.2. Proceso de Conversión A/D

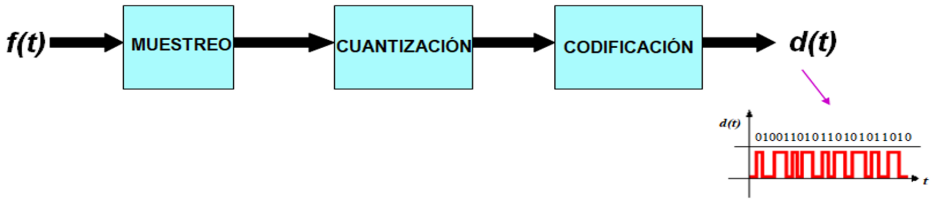


Fig. 1. Proceso de Conversión A/D

Muestreo: Es un proceso temporal. Las señales analógicas se muestrean en determinados valores temporales. (Tropena, 2006; Abasi, et al., 2023).

Cuantificación: Es el proceso de evaluación del potencial. El valor de muestreo de una señal analógica se asigna a partir de un conjunto limitado de valores a un valor predeterminado.

Codificación: Es la representación numérica del valor cuántico. Primero asigna un valor numérico a cada muestra de señal analógica. (Carlson, 2007; Bhooshan, 2022)

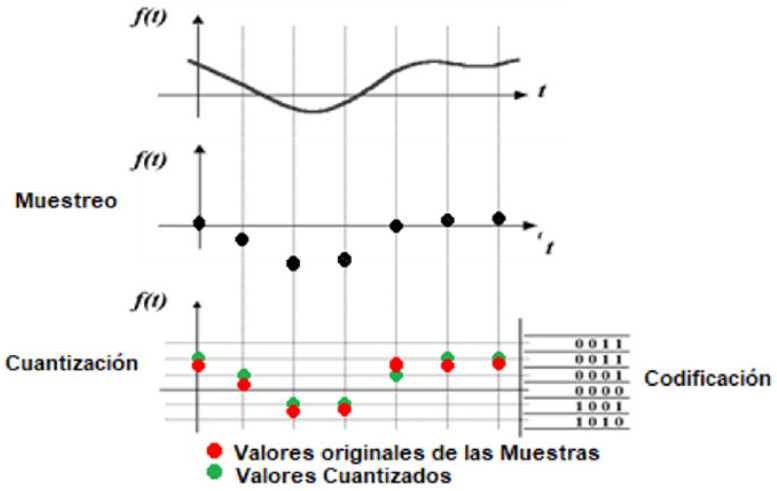


Fig. 2. Señales en el proceso de Muestreo, Cuantificación y Codificación.

De acuerdo con esto, las señales se toman de un proceso natural y son muestreadas a una frecuencia, de la cual salen los valores cuantizados, los cuales una vez obtenidos son sometidos a en un ajuste a un proceso de codificación. (Tropena, 2006; Delavernheet al., 2023)

1.3. Muestreo

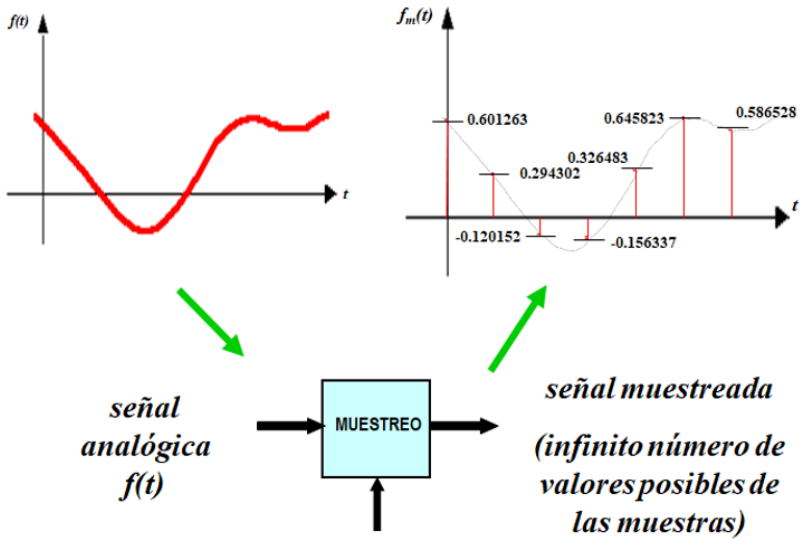


Fig. 3. Proceso de Muestreo.

El proceso de muestreo se encarga de tomar las muestras de acuerdo con los unos instantes definidos de tiempo, determinando valores los cuales representan el valor de la señal en dicho instante de observación, dando como resultado un posible valor infinito de posibles muestras. (Buehler & Lunden, 1966; Faraz Ul Abrar & Michelusi, 2023)

1.3.1. Muestreo Ideal (Instantáneo)

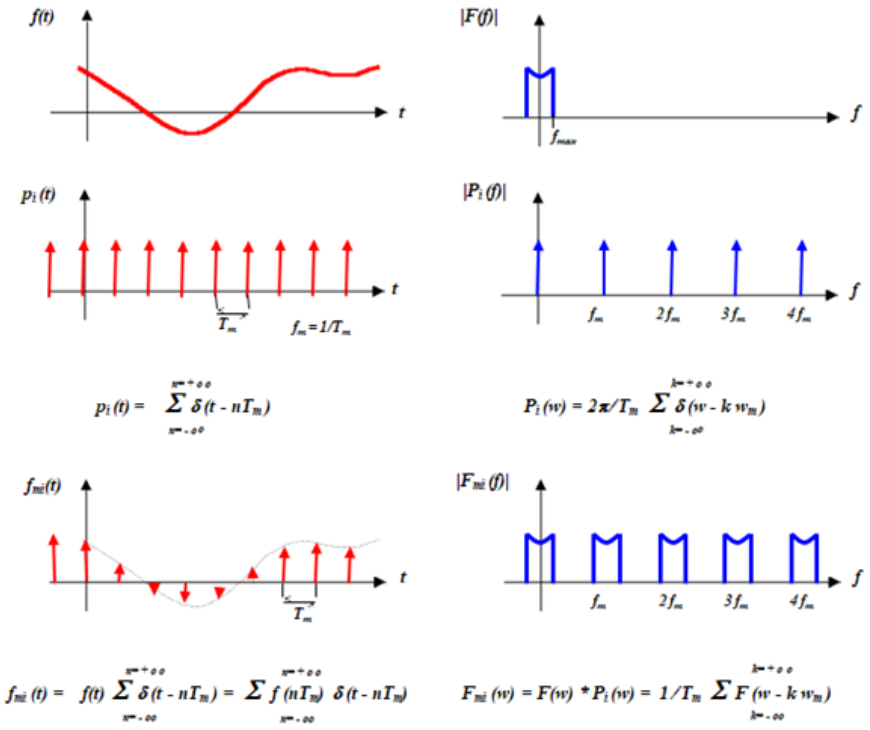


Fig. 4. Muestreo Ideal.

El muestreo ideal, como se ve en la Fig. 4, se hace usando una señal en forma de pulsaciones unitarias, que se repite a un intervalo de tiempo Tm, lo cual produce los valores de las muestras en el dominio de la frecuencia, las cuales están espaciadas en valores de fm. Como se aprecia, esto se hace en el dominio del tiempo, y su respuesta se nota en el dominio de la frecuencia, lo cual determina el concepto de la traslación de señales del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, lo cual considera un concepto de una transformada. (Armstrong, 1984; Gibson, 2023)

1.3.2. Recuperación de la Señal Original a Partir de sus Muestras

El proceso de recuperación de una señal se hace usando un filtro pasa-bajos que toma las frecuencias tratadas en el dominio del tiempo,

y esto da la posibilidad de recuperar dicha señal en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia. (Abramson, 1986; Feng, 2023)

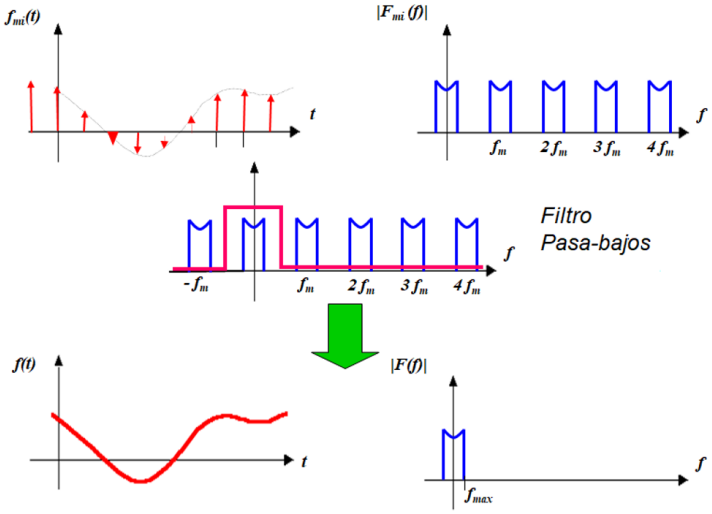


Fig. 5. Recuperación de una Señal.

1.4. Consideraciones en la Frecuencia de Muestreo

El teorema de Nyquist es la referencia que determina como debe muestrearse una señal, lo cual se considera que debe hacerse cuando se tiene en cuenta una frecuencia observada f, y se trata con una frecuencia de muestreo fs. La relación que debe existir es que la frecuencia de muestreo debe ser mayor o igual a dos veces la frecuencia observada, es decir, **fs ≥ 2f**. Esta relación de muestreo es inadecuada para propósitos prácticos. Con esto hay que plantear como se debe muestrear adecuadamente.

La frecuencia de muestreo determina cada cuanto se realiza el proceso de tratamiento de señales, en el caso de que la velocidad de muestreo sea alta va a implicar que se dan más puntos de muestreo en un tiempo dado y se puede obtener una obtención más precisa de señal, esto produce pulsos en frecuencia proporcionalmente espaciados y

en un alto grado, esto da reconoce como sobre-muestreo; cuando se usa una frecuencia de muestreo baja, esto repercute en que la señal queda sub-muestreada y la representación del espectro crearía el efecto de aliasing, lo cual ocurre cuando la frecuencia de muestreo es menor al doble de la frecuencia máxima del espectro de la señal analógica e incluye la presencia de frecuencias de imagen en el rango de frecuencia de interés que impide una reproducción precisa de la señal del análisis interno.

La baja tasa de muestreo en el dominio del tiempo produce una gran cantidad de señal piloto en el dominio de la frecuencia. Si la frecuencia de muestreo es el doble de la frecuencia a procesar, se considera muestreo crítico. (Carlson, 2007; Haykin, 2005;Hosseinalipouret al., 2022)

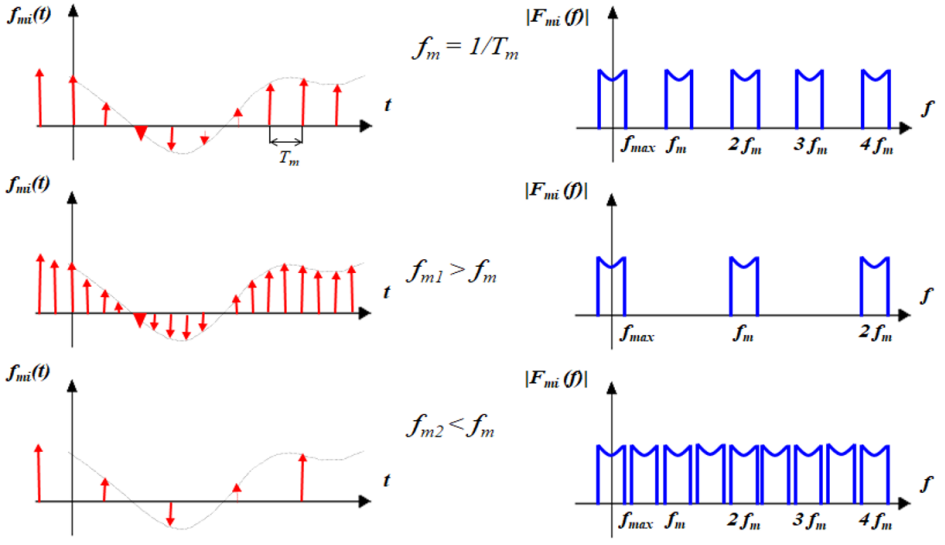


Fig. 6. Alternativas de muestreo en una Señal.

1.5. Mínima Frecuencia de Muestreo

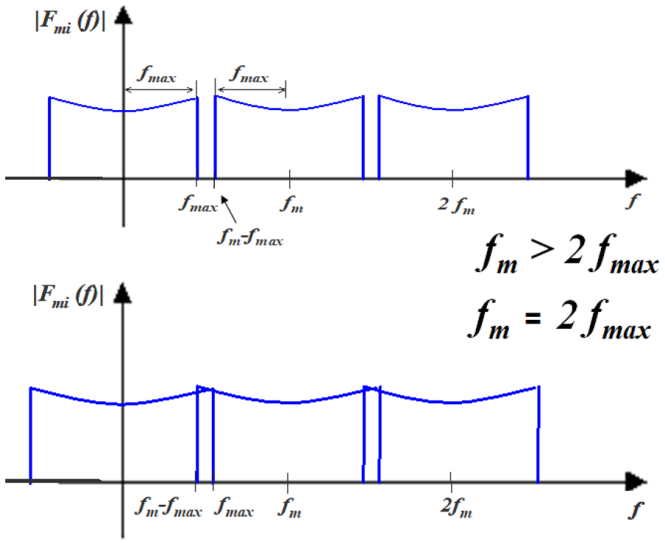


Fig. 7. Determinación de la frecuencia mínima de muestreo.

La frecuencia mínima requerida fm = 2fmax determina el rango de la señal a procesar e indica que debe muestrearse al menos el doble de la frecuencia más alta de la señal para aislar los componentes de frecuencia de una señal. (Carlson, 2007) (Tomasi, 2003)

	Rango de Frecuencias [Hz]	**Rango de Muestreo [kHz]**
Voz Telefónica	300 – 3,400	8
Voz de Banda Ancha	50 – 7,000	16
Audio Medio	10 – 11,000	24
Audio de Banda Ancha (CD)	10 – 20,000	44.1

Fig. 8. Ejemplos de Muestreo de Señales.

1.6. Tipos de Muestreo

1.6.1. Muestreo Natural

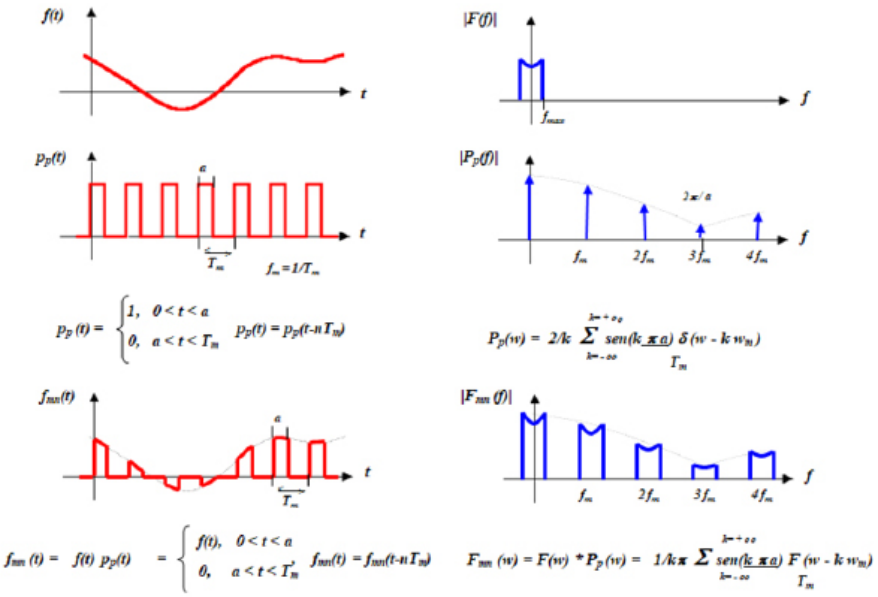


Fig. 9. Muestreo usando una señal discreta tipo escalón de periodo Tm.

En la Fig. 9 Se puede visualizar el efecto de muestrear con una señal discreta tipo escalón de TM utilizando una señal separada de tipo paso a paso para determinar la señal de salida de la salida muestreada en los dominios del tiempo y la frecuencia. (Medina Delgado, et al. 2017) (Jiacheng et al., 2024)

1.6.2. Muestreo de Pulso Plano y Sostenido

En la Fig. 10. efecto del muestreo de una señal tipo escalón discreta de duración T para calcular las señales de salida puede observarse en los dominios del tiempo y la frecuencia. (Stremler, 2008; Jing & Xiao, 2022)

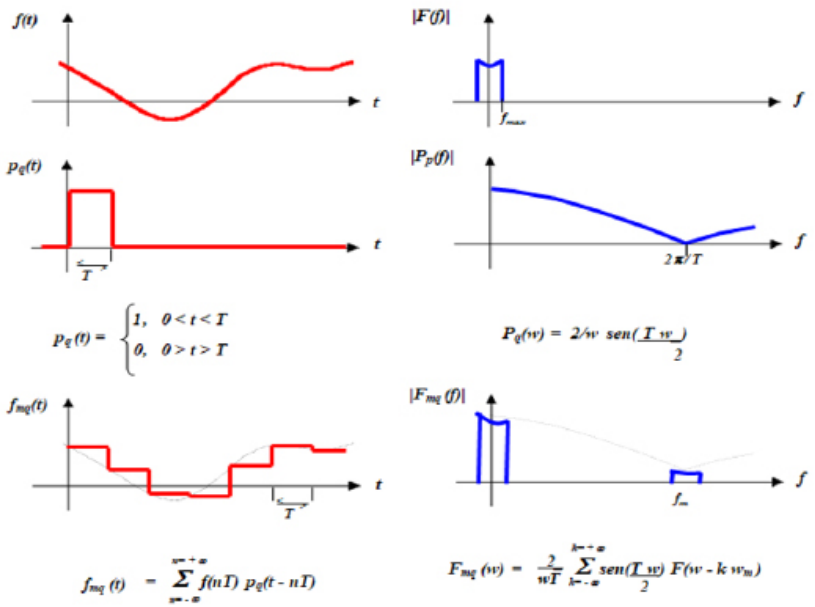


Fig. 10. *Muestreo usando una señal discreta tipo escalón con duración T.*

1.7. Cuantización

El modelo cuantificado fm(t) devuelve el valor de la magnitud más cercano a su valor original en N valores discretos predeterminados, lo que da lugar a un error. (Tomasi, 2003)

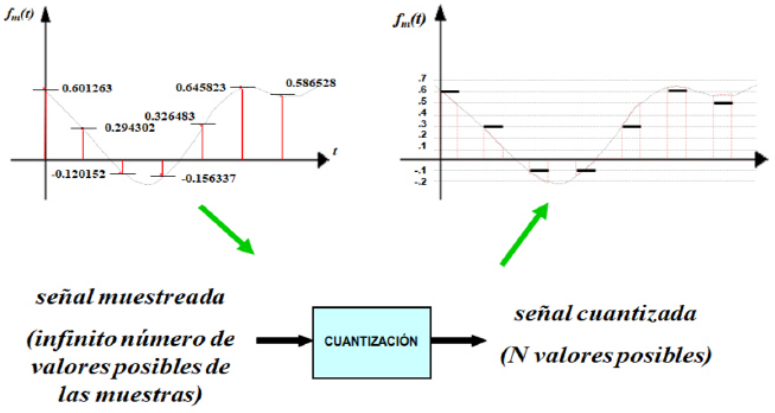


Fig. 11. *Proceso de Cuantización de una señal.*

El error de cuantización se reduce cuando se especifican valores más precisos.

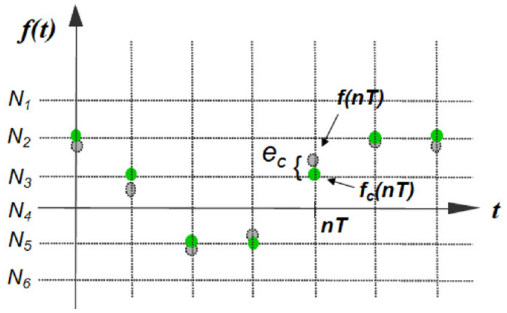


Fig. 12. Concepto Gráfico del Valor de la Cuantización de una señal.

	Valores Posibles (n)
Voz Telefónica	256
Voz de Banda Ancha	256
Audio Medio	65,536
Audio de Banda Ancha (CD)	65,536

Fig. 13. Ejemplos de Número de Valores en la Cuantización.

1.8. Codificación

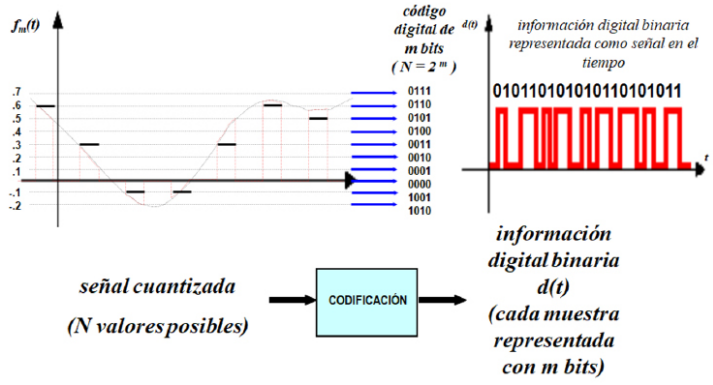


Fig. 14. Proceso de la Codificación.

La codificación asigna un valor numérico (binario) a cada uno de los N valores únicos utilizados en una cantidad.

Trata de la relación entre los valores de N en la representación codificada en binario de los números: los dígitos asignados al código digital no están directamente relacionados con el verdadero valor de la señal f(t), pero f(t) sí lo está. Considerado para la química general. Al convertir de digital a analógico, el verdadero valor de f(t) puede recuperarse mediante un proceso de desnormalización (normalmente multiplicando por una constante y sumando o restando la parte lineal). (Proakis & Salehi, 2002; Sze, 2021)

$$N = 2^m$$

	Rango de Frecuencias [Hz]	Rango de Muestreo [kHz]	Bits por Muestra (m)	Velocidad [kb/s]	Almacenamiento 3.5 min [MB]
Voz Telefónica	300 – 3,400	8	8	64	1.6
Voz de Banda Ancha	50 – 7,000	16	8	128	3.3
Audio Medio	10 – 11,000	24	16	384	10.0
Audio de Banda Ancha (CD)	10 – 20,000	48	16	768	20.1
Audio Disco Compacto (Estéreo)	10 – 20,000	44.1	16 x 2	1,411	37.0

Fig. 15. Características de Conversión A/D de Varias Señales.

1.9. Sistema de Comunicaciones Digitales

En la siguiente Figura 16, se muestra la estructura de sistema de comunicaciones extremo a extremo, en el cual se dispone la parte estructural de un transmisor y un receptor, y donde se consideran las partes referenciales de cada uno de estos, considerando el flujo de procesamiento de los datos que son manipulados desde el contexto de una señal física. (Tropena, 2006; Kokhanov, 2023)

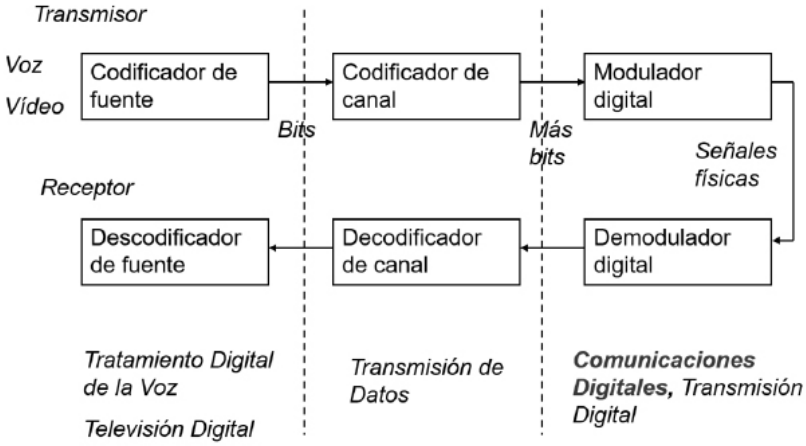


Fig. 16. Estructura de Sistema de Comunicación Digital.

1.10. Proceso de Transmisión de Datos

El proceso de transmisión de datos para recibir una señal depende de la aplicación y de la finalidad del tratamiento. Sin duda, en el caso de la transmisión en banda base. Este canal permite la transmisión directa de señales eléctricas que representan datos. Canal de ancho de banda: Canal que no permite la transmisión directa de señales eléctricas que representan datos. Estos canales suelen representar una gama de frecuencias diferente para las señales digitales y/o limitan el ancho de banda disponible. (Abramson, 1986; Blake, 2006)

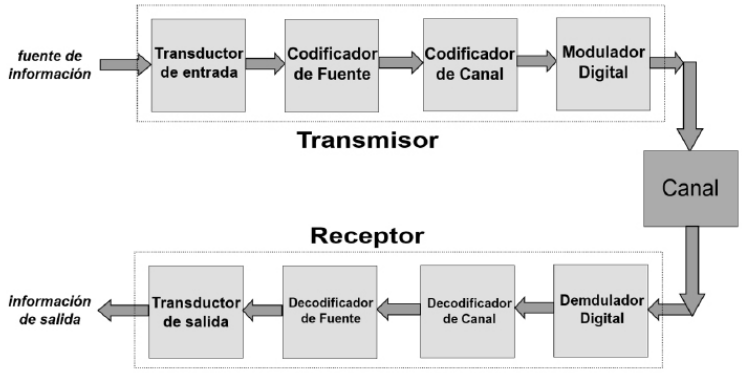


Fig. 17. Especificación del proceso de Transmisión de datos

En este proceso de transmisión de datos, como el visto en la Figura 17, se está manejando un número de unidades de información básica, definidas en bits, los cuales se manipulan y se pueden convertir simultáneamente por medio de formatos y protocolos, que permiten adecuar la información en forma de señales a través y para del canal de comunicación. Es una realidad decir que lo sistemas de procesamiento, y en ese caso los sistemas de cómputo no llevan a cabo el procesamiento de un bit a la vez, y esto se hace en modo de estructuras de datos.

La conexión básica que puede tener un nodo o host es una conexión que históricamente inicio de forma paralela y se transformó en una forma serial, lo que permitió ahorros físicos e incremento en la velocidad de transmisión, debido a que se pueden manejar múltiples flujos de información. (Kumar et al., 2023)

Una vez que la información ha sido codificada y puesta en un formato adecuado a las condiciones del circuito de comunicación, como se ve en la Figura 18, Los sistemas de procesamiento de la información necesitan ayuda para transmitir estas señales a través de los enlaces de comunicación, generando señales codificadas, pero reduciendo el ruido y el retardo asociados al paso por estos mecanismos para determinar que una señal está lista para ser enviada por un canal.

El trabajo de entregar información por parte del dispositivo de origen al siguiente dispositivo en el circuito de comunicación, que es el receptor, se hace por medio de un mecanismo denominado interfaz, la cual conecta los dispositivos que deben definir adecuadamente las características y ajustarse al establecimiento de los estándares. En tal sentido, es importante conocer las propiedades físicas y lógicas del punto de interfazamiento, como las especificaciones mecánicas, como la forma, cantidad y modo de asociar lo cables o filamentos para transmitir, las características eléctricas, como amplitud, frecuencia y fase de la señal, y lo que esto implique en cuanto a sus especificaciones funcionales. (Buehler & Lunden, 1966; Lee, Cheng et al., 2023)

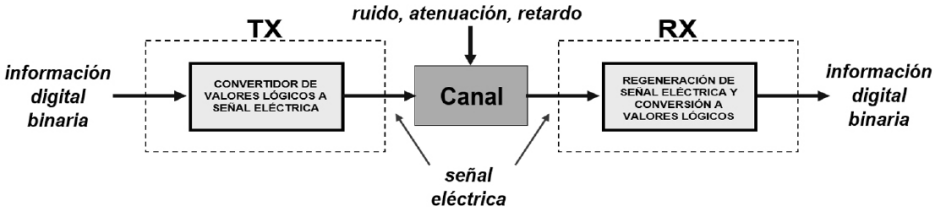


Fig. 18. Condicionamiento del circuito de comunicación.

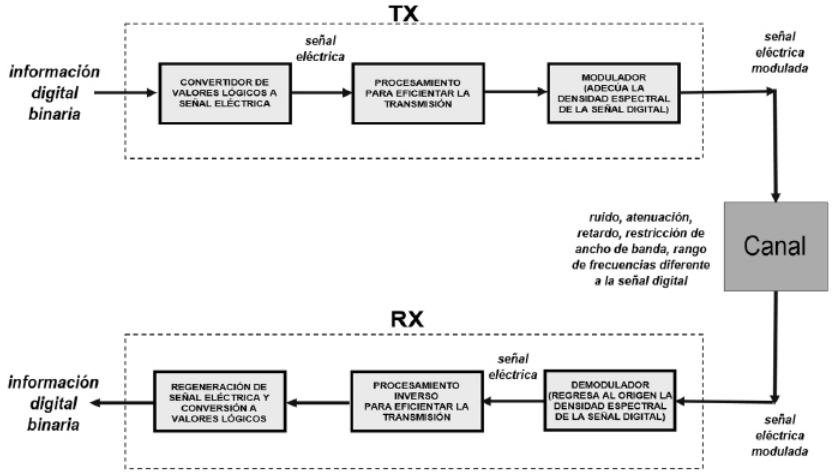


Fig. 19. Especificación del proceso de Transmisión de datos.

1.11. Transmisión de Datos en Banda Base (I)

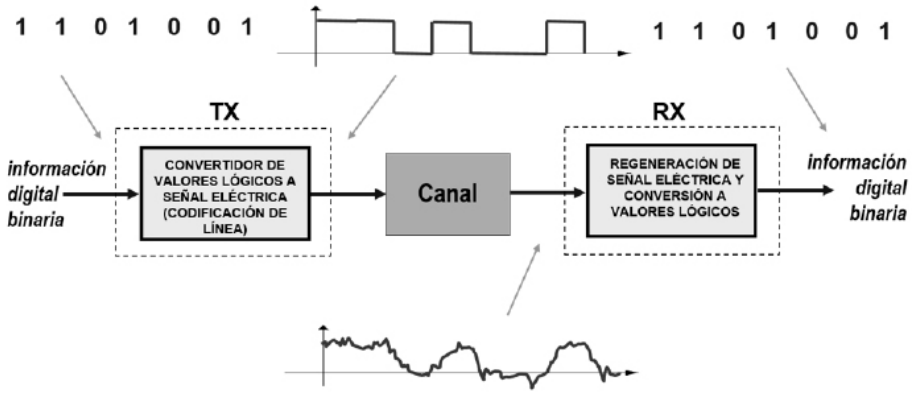


Fig. 20. Especificación del proceso Transmisión de Datos en Banda Base (I).

1.12. Transmisión de Datos en Banda Base (II)

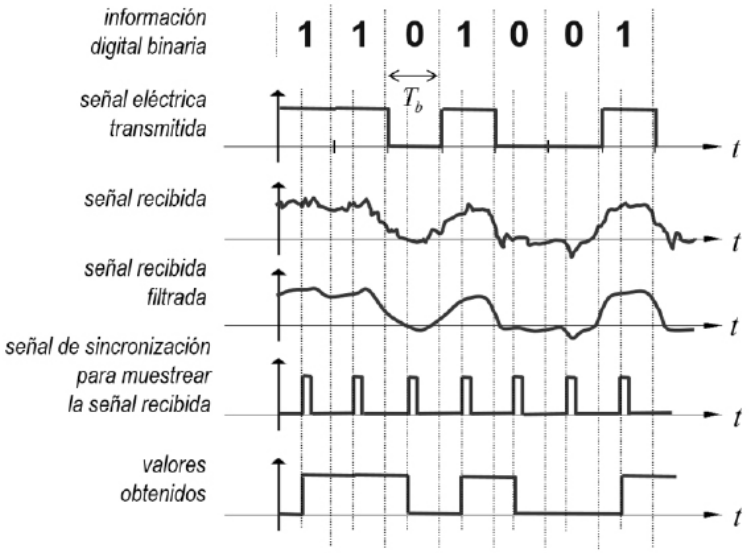


Fig. 21. Especificación del proceso Transmisión de Datos en Banda Base (II)

1.13. Regeneración de la Señal Eléctrica

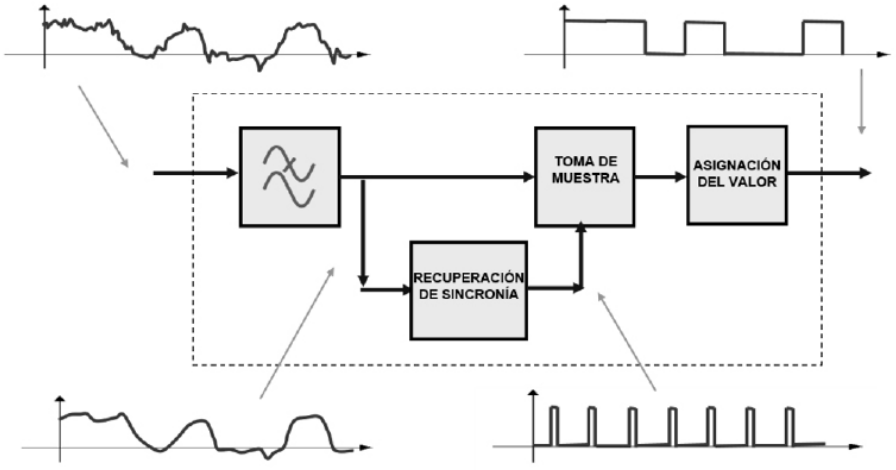


Fig. 22. Conversión de Señal. Analógica a Señal Digital.

CAPÍTULO 2

TRANSMISIÓN DE DATOS EN BANDA BASE, TRANSMISIÓN DE LA SEÑAL DIGITAL

Resumen

La razón por la que se utiliza la tecnología digital en las comunicaciones es la imperiosa necesidad en el tratamiento de las señales, que en la actualidad deben ser tratadas masivamente, ya que dan soporte a procesos de comunicación que dan sentido a la transmisión de datos multimedia. Desde el punto de vista de la comunicación digital existen dispositivos encargados de coordinar todos los acontecimientos de la vida cotidiana y convertirlos en paquetes de datos o información que forman un esquema de red como un sistema orientado sin conexión en la conmutación de paquetes. La comunicación de datos en la actualidad. Uno de los parámetros que deben contemplar todos los métodos de comunicación es el parámetro de la distancia que recoge otros aspectos del mismo procesamiento de la señal. Los sistemas analógicos tienen amplificadores diseñados para inyectar ruido adicional para ayudar a localizar objetivos a distancia. De lo contrario, ocurre en los dispositivos repetidores que manejan el concepto técnico de gestión de la distancia en las redes actuales suponiendo que no se inyecta ruido adicional. Se trata del Ruido del canal de comunicación.

Palabras clave: Transmisión de Datos, paquetes de datos, conmutación de paquetes, canal de comunicación, esquema de red.

Abstract

The reason why digital technology is used for communication is the urgent need for signal processing which currently needs to be processed on a large scale to support the communication process that makes the transmission of multimedia data meaningful. From the point of view of digital communication there are devices responsible for coordinating all the events of daily life and converting them into packets of data or information that form a network scheme as a connectionless oriented system in packet switching. Data communication today. One of the parameters that all communication methods must address is the distance parameter that captures other aspects of the same signal processing. Analog systems have amplifiers designed to inject additional noise to help locate targets at a distance. Otherwise, it happens in repeater devices that handle the technical concept of distance management in today's networks assuming no additional noise is injected. It's about of Communication channel noise.

Keywords: *Data transmission, Data packets, packet switching, communication channel, network diagram.*

2.1. Datos Analógicos, Señales DigitalesAntecedentes

Para el manejo de la idea de la digitalización y de apropiada gestión de los datos de esta, se han implementado las apropiadas técnicas que ayudan al manejo y control de las señales en el ámbito digital, debido a la consideración física que se debe tener por la naturaleza de estas. Los mecanismos utilizados para ello son la multiplexación por división de tiempo (TDM) y la multiplexación por división de tiempo (TDMA) para señales digitales. En TDM no hay ruido de intermodulación, lo que se considera un inconveniente de FDM. También es un hecho que la conversión a señales digitales permite que se haga un uso más eficiente de las técnicas de conmutación digitales, además de lo que suceda con el BW. (Miller, 2002)

2.2. Multicanalización por División de Tiempo de señales Analógicas

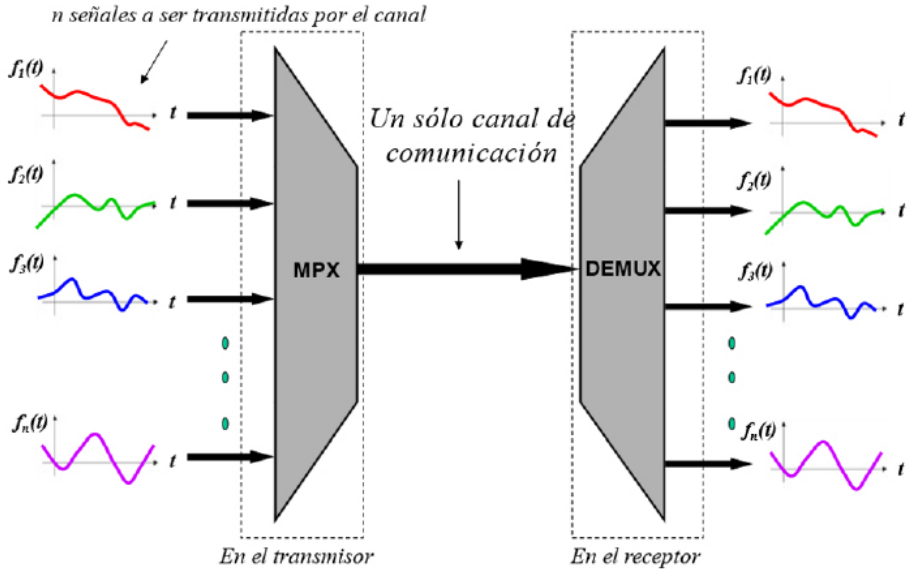


Fig. 23. Esquema de un sistema de Multicanalización extremo a extremo.

Cuando se tiene un sistema de transmisión-recepción, toma en un extremo las señales analógicas de entrada y les da el respectivo tratamiento para que estas mismas se reproduzcan lo más fiel posible en el extremo de salida. Esto se aprecia en la Fig. 23. (Miller, 2002)

En la parte transmisora se supone que hay n señales analógicas transmitidas por un único canal y distribuidas en diferentes intervalos de tiempo definidos por T1 a Tn. También se supone que las señales recibidas en el extremo transmisor se introducen en el sistema de comunicación de forma separada y en intervalos de tiempo diferentes, como se muestra en Fig. 24. (Miller, 2002) (Lim, y otros, 2019)

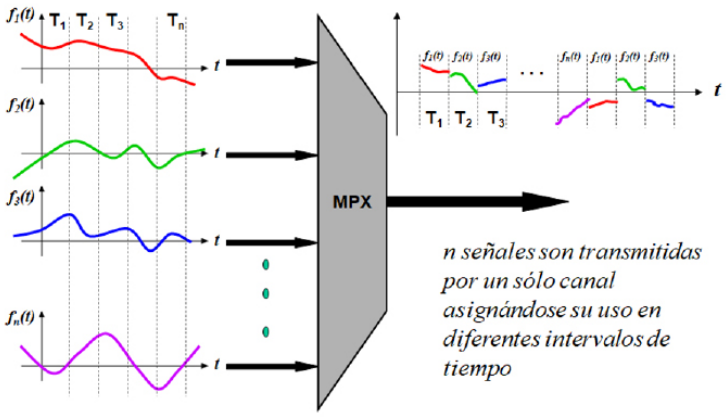


Fig. 24. Introducción de Señales analógicas en el extremo transmisor

Como se aprecia en la Fig. 24, las señales analógicas segmentadas que entran al sistema en los intervalos definidos son recibidos por un mecanismo de múltiplexación, que le da la idea de manejar múltiples canales a través de este, y construyendo en su salida una única señal que está compuesta por la segmentación que se les otorga a las señales entrantes a dicho sistema, y aportando cada una de éstas un trozo de sus señales analógicas incidentes. (Tomasi, 2003)

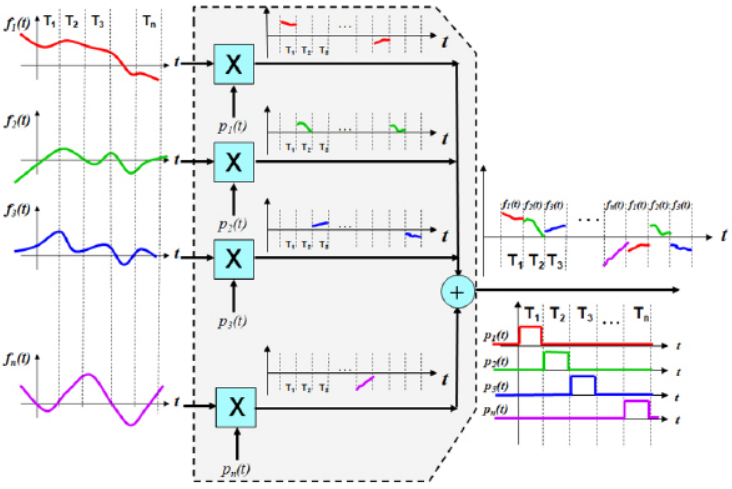


Fig. 25. Esquema del Dispositivo multicanalizador de Señales analógicas en el extremo transmisor

El muestreador utiliza señales (digitales) para tomar muestras discretas Pn(t) en cada intervalo Tn. La composición de las señales se rige por el principio de superposición: cada una de las n señales se transmite a otras señales en distintos intervalos de tiempo y las muestras resultantes forman una única señal. (Tomasi, 2003)

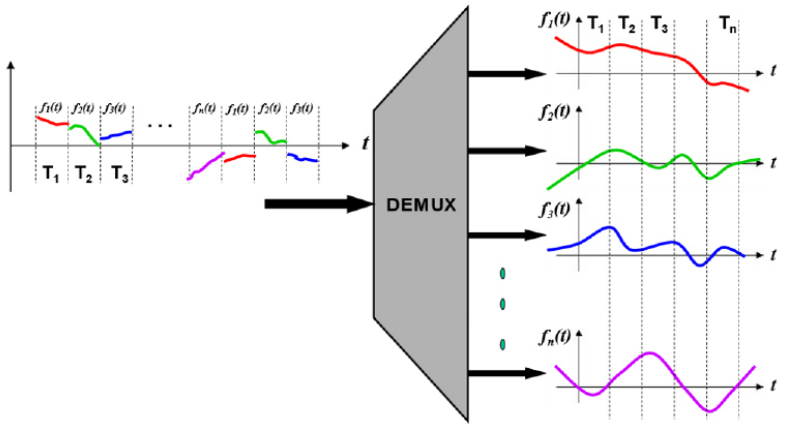


Fig. 26. Salida de Señales analógicas en el extremo receptor.

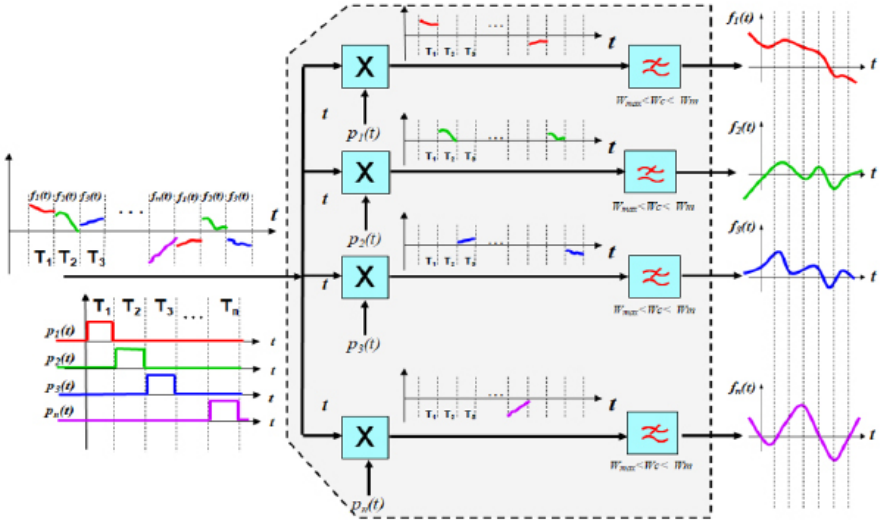


Fig. 27. Esquema del Dispositivo multicanalizador de Señales analógicas en el extremo receptor.

El dispositivo que recupera las señales debe tomar las muestras en el receptor mediante el uso de una señal digital pn(t) para realizar un muestreo discreto por cada intervalo Tn; las muestras de cada una de las n señales deben ser separadas para poder ser filtradas individualmente, la descomposición de las señales se rige por el principio de la superposición pero en un sentido inverso, para conformar de nuevo las señales resultantes y dividirlas para las respectivas señales por separado, como se ve en la Fig. 27. (Carlson, 2007)

Cuando el sistema de multicanalización se conecta entre sus extremos transmisor y receptor, se determina que los extremos introducen y extraen las señales analógicas usando el mismo esquema, considerando que un canal de telecomunicaciones que interfaza sus extremos puede usar un esquema de manejo de señales que puede tener una naturaleza que puede ser igual o distinta a lados transmisores y receptores. (Mikolajick, 2021)

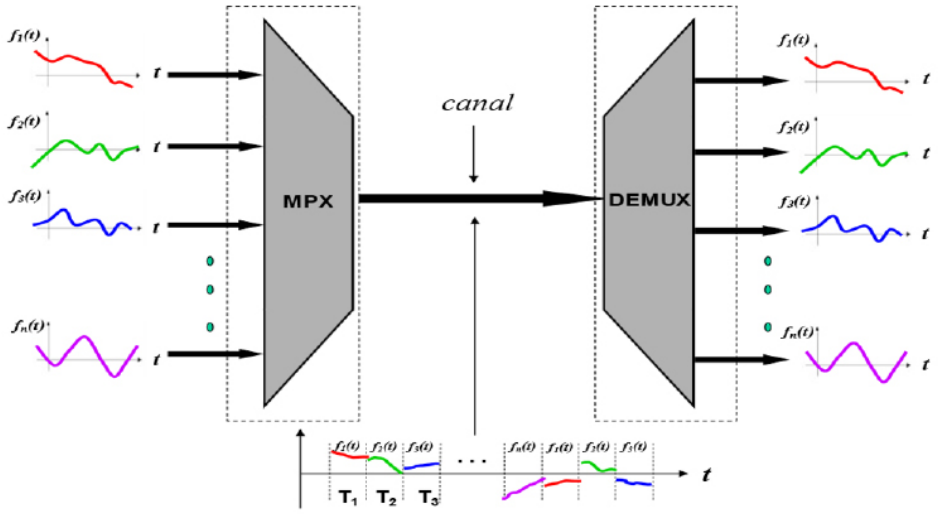


Fig. 28. Sistema de Telecomunicaciones con multicanalización de señales analógicas

Una señal analógica multicanal se puede muestrear en el tiempo mediante una señal que se repite en el tiempo Tm, como se muestra en la Fig. 29: $f_m > 2 f_{max}$

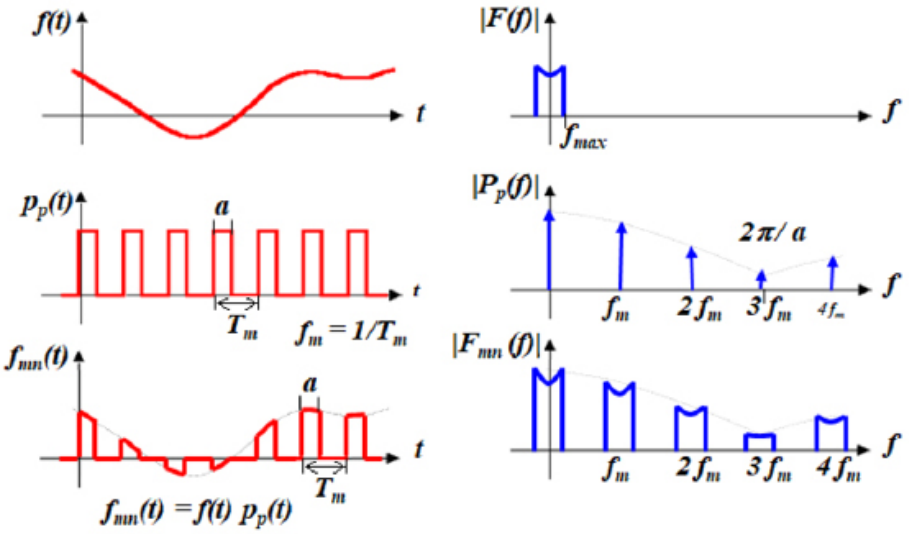


Fig. 29. Señal Analógica multicanalizada muestreada en el tiempo

El tratamiento de las señales analógicas, mediante el uso y apoyo de señales discretas, determinan precisamente la forma en como actualmente se manejan las señales que tienen un comportamiento continuo. Es de aclarar que la forma en cómo se disponen estos sistemas, determinan realmente lo que a nivel funcional hoy en día se busca para darle más simpleza y robustez a las señales en presencia ruido, ya que los sistemas que se apoyan en esquemas discretos son más robustos respecto al manejo de la relación S/N. (Tropena, 2006)

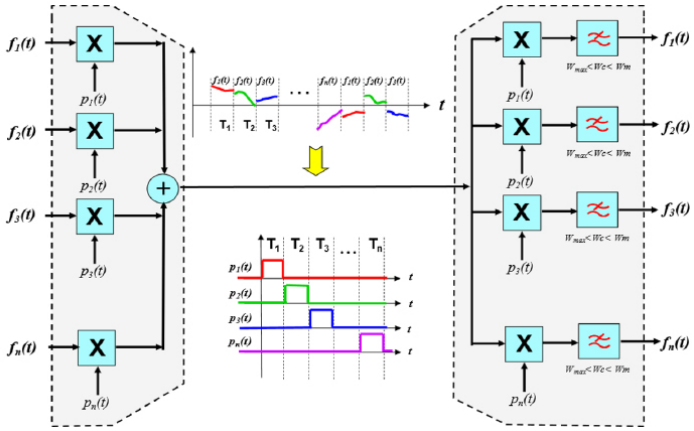


Fig. 30. Especificación de la Multicanalización por División del Tiempo de Señales Analógicas

2.3. Multicanalización por División del Tiempo de Señales Digitales

En una señal digital multicanal, el flujo de la señal (si se envía o no) se controla para que la señal se integre correctamente en el canal. En el sistema analógico se supone que se transmiten n señales por el canal del emisor, y de nuevo se asigna su uso en intervalos desde un T1 hasta un Tn. Con esto ya se deja considerado que las señales digitales que entran al extremo transmisor llegan de forma segmentada y en diferentes intervalos de tiempo, esto se ve en la Fig. 31 (Sundberg, 1986).

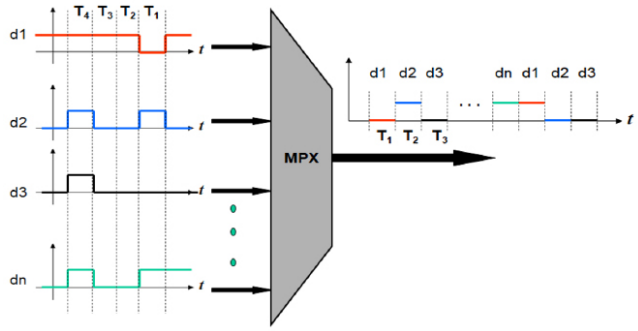


Fig. 31. Introducción de Señales digitales en el extremo transmisor

Como se aprecia en la Fig. 31 y 32, las señales digitales segmentadas entran al sistema en los intervalos y son recibidas por los adecuados dispositivos y mecanismos de tratamiento de señales de esta clase, y esto da la idea de manejar múltiples canales a través de éste, y se conforma a la salida una simple señal que se compone por los trozos resultantes de la segmentación de las señales que entran al sistema, y que aportan cada una de éstas un trozo de sus señales digitales incidentes (Pinto García, 2015).

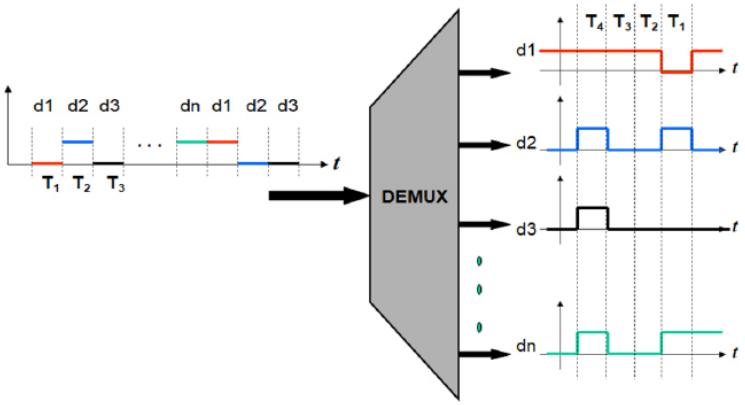


Fig. 32. Salida de Señales digitales en el extremo receptor.

Cuando el sistema de multicanalización, finalmente conecta los extremos transmisor y receptor, se tiene especificado que los extremos introducen y extraen las señales digitales, usando el mismo esquema que en este caso se afirma que se puede usar el TDM, considerando que el canal de interconexión interfaz a sus extremos, y este medio puede usar un estilo técnico de manejo de señales que puede ser igual o distinto a lados en donde se encuentran tanto el transmisor y receptor (Blake, 2006).

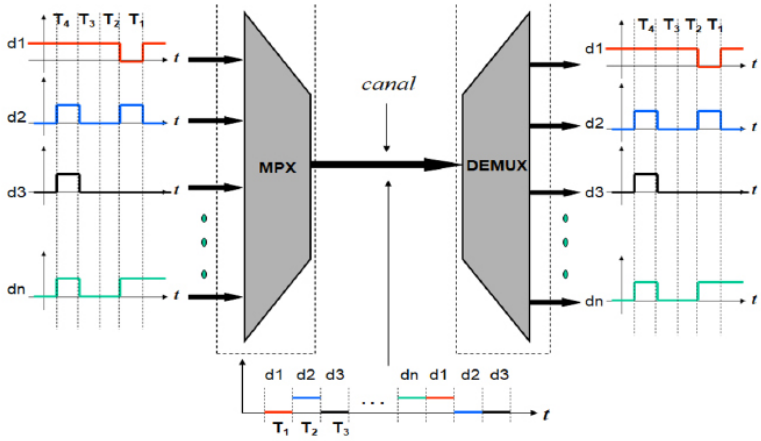


Fig. 33. Sistema de Telecomunicaciones con Multicanalización y Desmulticanalización por División de Tiempo

Cabe considerar que la entrada y salida de señales a los sistemas discretos, debe tener un procesamiento, en especial en la parte del transmisor, donde para poder introducir una señal del mundo continuo, debe sufrir el proceso del muestreo, cuantificación y codificación respectivo, y con esto cumplir con las condiciones que requiere la naturaleza del sistema telecomunicaciones. En el extremo receptor, debe darse el proceso complementario, es decir que los patrones de señal que llegan y se obtengan, deben considerar que las señales sean tratadas por medio de una decodificación y el uso de filtros, que por lo general son pasa-bajos, para la recuperación final de las señales. (Alvin, 1965)

2.4. Caracterización de las Modulaciones que van a manejar la información

El teorema del ancho de banda del canal gaussiano de Shannon, enunciado por Claude Shannon en 1948, proporciona un término de comparación. La teoría establece:

$$R < R_0 = W \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

También existen modulaciones que permiten alcanzar probabilidades de error arbitrariamente bajas. Donde:

R [bits/s]

W Ancho de banda

S Potencia de señal

N Potencia de ruido

Para $\mathbf{P_E=10^{-9}}$ las modulaciones sencillas dan muestran este comportamiento como se ve en la gráfica.

Límite de Shannon:

$$\frac{R}{W} = \log_2(1 + (\frac{E_b}{N_0})(\frac{R}{W}))$$

El teorema de Shannons establece que toda esta energía puede ahorrarse: 10 dB de ahorro = 1/10 del consumo de energía.

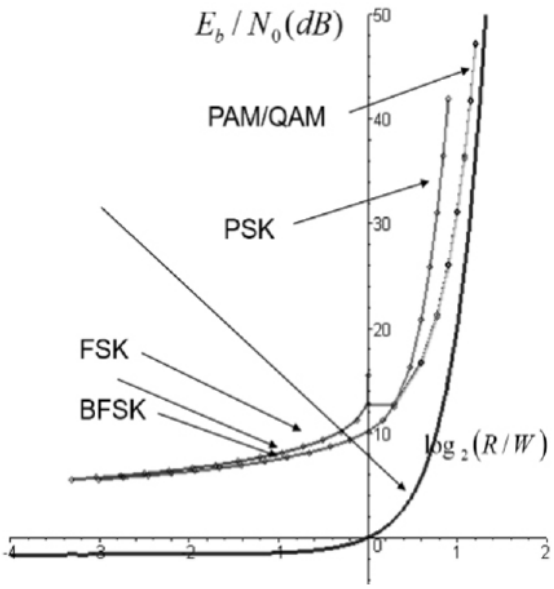


Fig. 34. Tipos de modulaciones Digitales relación R/W

2.5. Acercamiento al límite de Shannon

Para llevar a cabo este propósito, es necesario conocer los esquemas de construcción de señales, que se fundamentan en el diseño y uso de modulaciones digitales, y esto equivale a empaquetar bien la información y las señales mismas en esferas, las cuales es una forma de expresar las dimensiones espaciales. (Carlson, 2007; Lathi, 2004; Feher, 2004)

Hay que tener en cuenta un aspecto importante de la modulación. Para ello es necesario definir las características de modulación de la siguiente manera:

- PAM: Dimensión 1 (la más baja posible).
- QAM y PSK: Dimensión 2 que definen los conceptos básicos aplicados en la comunicación digital en términos de modulación y utilización de campos para el empaquetado de datos e información de la señal representada.
- FSK: no se utiliza bien la dimensión alta (sólo una dimensión de señal).

2.6. Diseño de modulaciones eficaces.

- La teoría de la transmisión digital se basa en conceptos geométricos:
- Una señal se considera como un punto en un espacio de cierta dimensión.
- La eficacia de la modulación depende de la distancia entre las señales.
- Sin embargo, esto tiene una ventaja conceptual, ya que es más fácil trabajar con puntos que con señales

CAPÍTULO 3

SEÑALES DIGITALES

Digital Signals

Resumen

Las señales digitales son representaciones discretas de información consistentes en secuencias de valores binarios (0 y 1). Estas señales se utilizan ampliamente en electrónica y telecomunicaciones para transmitir y procesar datos de forma eficaz y fiable. Al convertir una señal analógica en digital se obtiene una mayor inmunidad al ruido y mejores capacidades de almacenamiento y procesamiento, lo que permite una amplia gama de aplicaciones en ámbitos como las telecomunicaciones, la electrónica de consumo y la informática. El proceso de señalización digital consiste en cuantificar y codificar la señal analógica de origen en una secuencia de bits digitales. Los usos más comunes son, comunicaciones: Las señales digitales son el núcleo de las redes de comunicaciones modernas. Permiten la transmisión eficaz y fiable de información a largas distancias a través de redes móviles de transmisión de datos por Internet y redes de área local (LAN). Dispositivos: Muchos dispositivos electrónicos de uso cotidiano, como teléfonos móviles, televisores, reproductores de música y periféricos, utilizan señales digitales para almacenar y transmitir datos. Esto ha dado lugar a la proliferación de sofisticados dispositivos electrónicos conectados. Informática y procesamiento de datos: Las señales digitales son la base de la informática moderna. Los ordenadores y los sistemas digitales utilizan señales digitales para procesar y almacenar datos, lo que permite realizar tareas que van desde el cálculo matemático hasta la ejecución de programas y aplicaciones complejas. Industria musical y del entretenimiento: Las imágenes musicales y

los vídeos se convierten en señales digitales para su almacenamiento, reproducción y distribución. Formatos digitales como MP3, JPEG y MPEG son ejemplos de cómo las señales digitales han cambiado la forma de ver y distribuir contenidos multimedia. Medicina: Campos como la radiología, la electrocardiografía y la telemedicina, las señales digitales juegan un papel crucial. Permiten el diagnóstico, la monitorización y el seguimiento de pacientes, así como el intercambio seguro de información médica.

Palabras clave: LAN, PCM, TDM, Formatos digitales, sistemas digitales.

Abstract

Digital signals are discrete representations of information consisting of sequences of binary values (0 and 1). These signals are widely used in electronics and telecommunications to transmit and process data efficiently and reliably. Converting an analogue signal to digital provides greater noise immunity and improved storage and processing capabilities, enabling a wide range of applications in areas such as telecommunications, consumer electronics and computing. The digital signalling process consists of quantifying and encoding the source analogue signal into a sequence of digital bits.

The most common uses are, Communications: Digital signals are at the heart of modern communications networks. They enable the efficient and reliable transmission of information over long distances through mobile Internet data networks and local area networks (LANs). Devices: Many everyday electronic devices such as mobile phones, televisions, music players and peripherals use digital signals to store and transmit data. This has led to the proliferation of sophisticated connected electronic devices. Computing and data processing: Digital signals are the basis of modern computing. Computers and digital systems use digital signals to process and store data, enabling tasks ranging from mathematical computation to the execution of complex programs and applications. Music and enter-

tainment industry: Music images and videos are converted into digital signals for storage, playback and distribution. Digital formats such as MP3, JPEG and MPEG are examples of how digital signals have changed the way multimedia content is viewed and distributed. Medicine: In fields such as radiology, electrocardiography and telemedicine, digital signals play a crucial role. They enable the diagnosis, monitoring and tracking of patients, as well as the secure exchange of medical information.

Keyword: LAN, PCM, TDM, *Digital formats, digital systems.*

3.1 Elementos de la modulación por Impulsos Codificados MIC o PCM Pulse Code Modulation

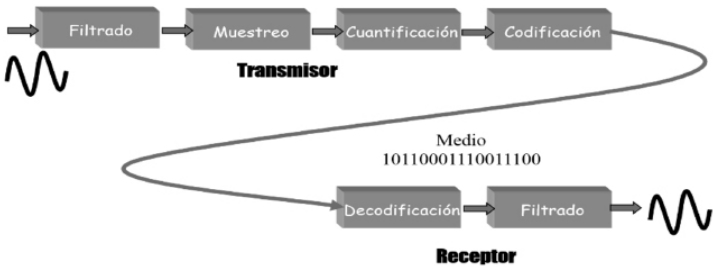


Fig. 35. Esquema de modulación PCM

3.1.1. Filtrado

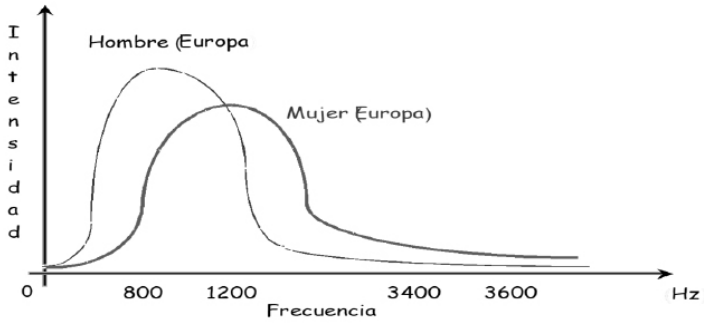


Fig. 36. Filtrado

3.1.2. Teorema de Muestreo

Cualquier señal analógica de banda limitada se puede representar mediante muestras, siempre que las muestras se tomen a 2 veces la frecuencia máxima de la señal muestreada, esto se determina según los criterios de Nyquist. (Carlson, 2007; Ramirez Viáfara et al.,2020).

3.1.3. Muestreo

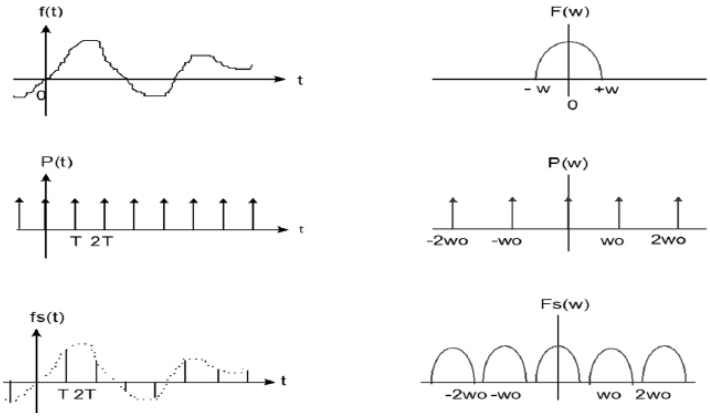


Fig. 37. Muestreo

3.1.4. Modulación

Proceso por el que una característica o parámetro de una señal cambia con respecto a otra señal.

3.1.5. Distancia de Muestreo

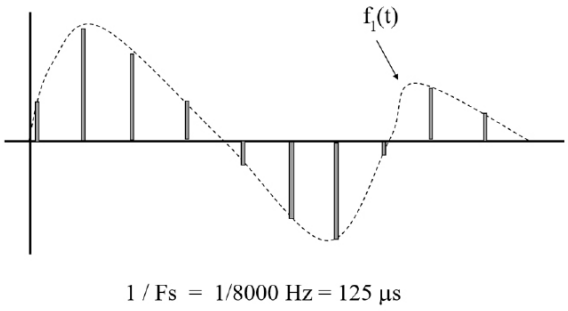


Fig. 38. Ejemplo de Muestreo

3.1.6. Cuantización

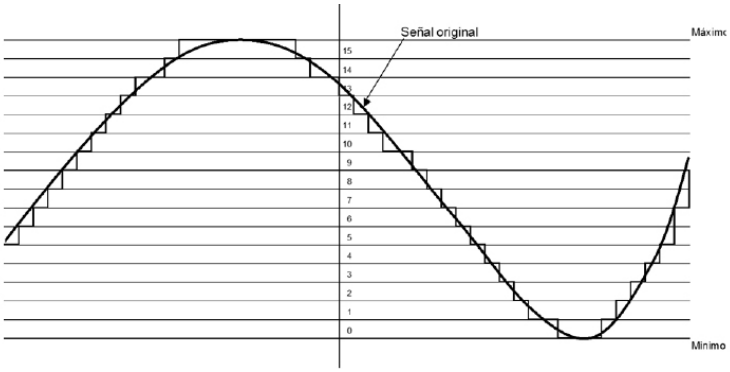


Fig. 39. Ejemplo de Cuantización

3.1.7. Error de Cuantización

Valor de la muestra	Valor Predeterminado	Error
9.8	10	2%
0.8	1	20%

3.1.8. Ley de Cuantización

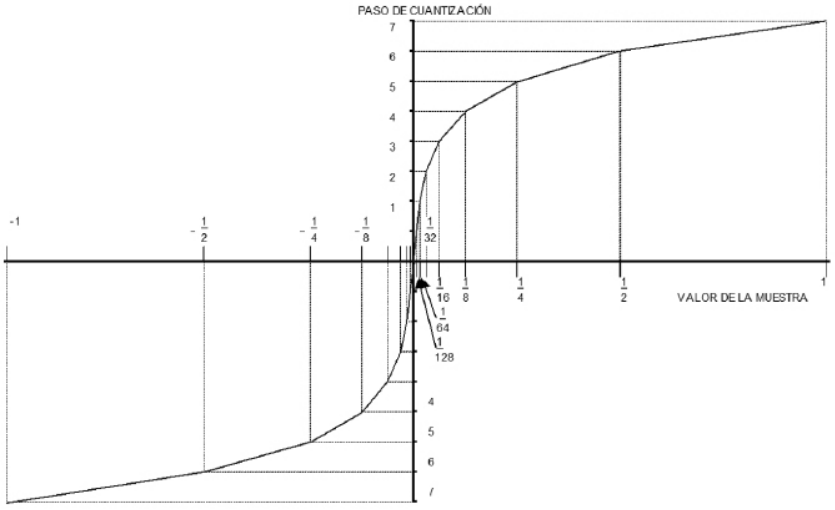


Fig. 40. Ley de Cuantización

3.1.9. Codificación

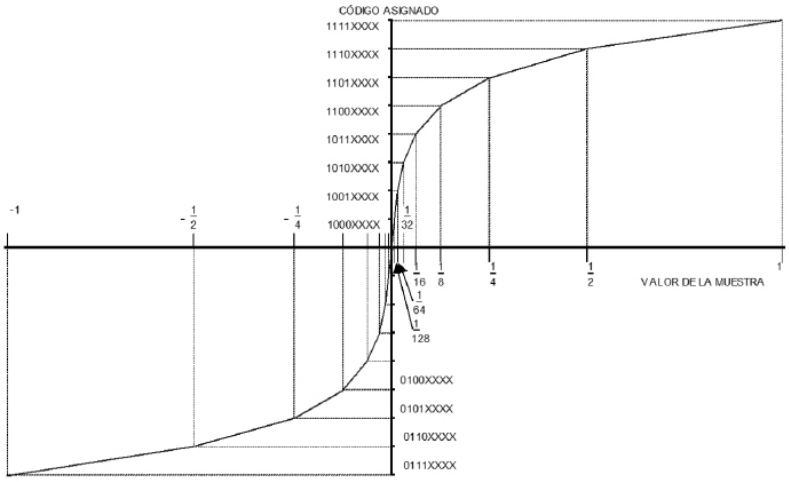


Fig. 41. Codificación

3.1.10. Velocidad del Canal

Finalmente, si se tienen 8 bits por muestra y 8000 muestras por segundo, entonces la tasa = 8000 muestras/segundo x 8 bits/muestra = 64000 bits/segundo.

3.2. Multiplexión por División de Tiempo o Time-division Multiplexing (TDM)

3.2.1. Definición Multiplexión por División de Tiempo (TDM)

- Fusión temporal de muestras procedentes de distintas fuentes, de forma que los datos recibidos de todas las fuentes se envían secuencialmente por el mismo canal de comunicación.
- Cómo combinar varias señales muestreadas en una secuencia determinada.

3.2.2. Multiplexaje de señales

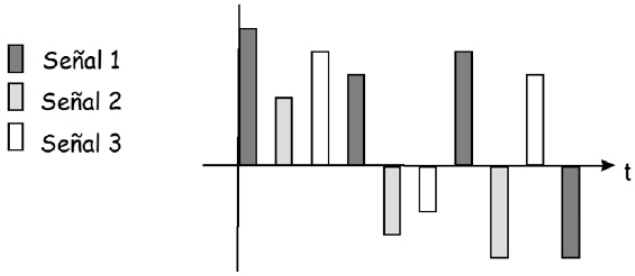


Fig. 42. Multiplexaje de señales

3.2.3. Cantidad de señales

Norma Americana, utiliza la disposición de 24 señales.

Norma Europea, usa una estructura así 30 señales + 2 de control = 32 x 64,000 bps = 2.048 Mbps

La Capacidad básica es conocida como E1

3.2.4. Estructura de Trama

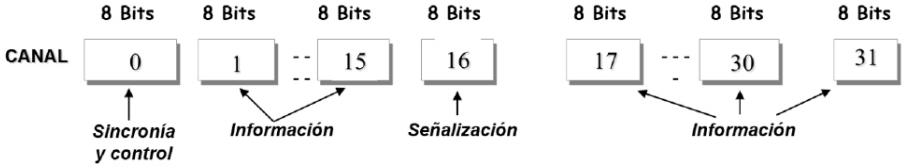


Fig. 43. Estructura de trama

3.3. Multicanalización II. Multicanalización por División de Tiempo (TDM)

3.3.1. Multicanalización

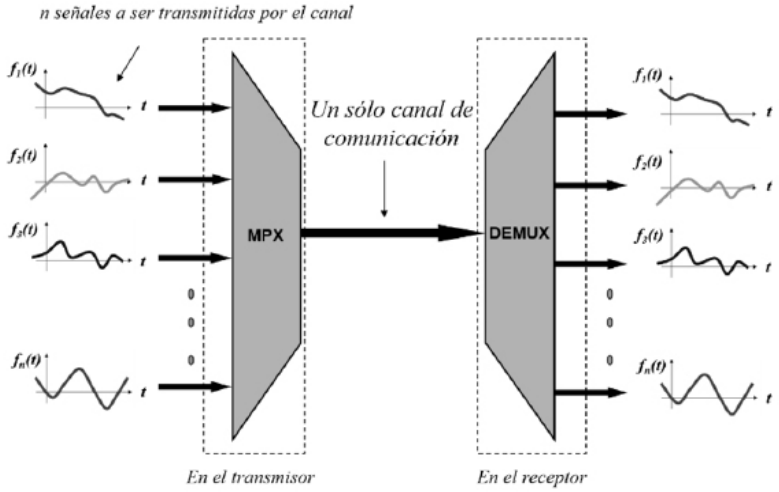


Fig. 44. Multicanalización

3.3.2. Multicanalización por División del Tiempo de Señales Analógicas I

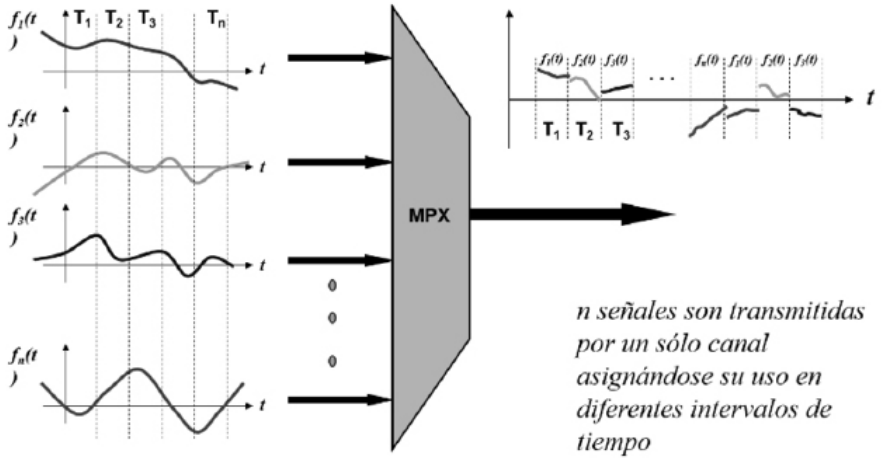


Fig. 45. Multicanalización por División del Tiempo de Señales Analógicas I

3.3.3. Multicanalización por División del Tiempo de Señales Analógicas II

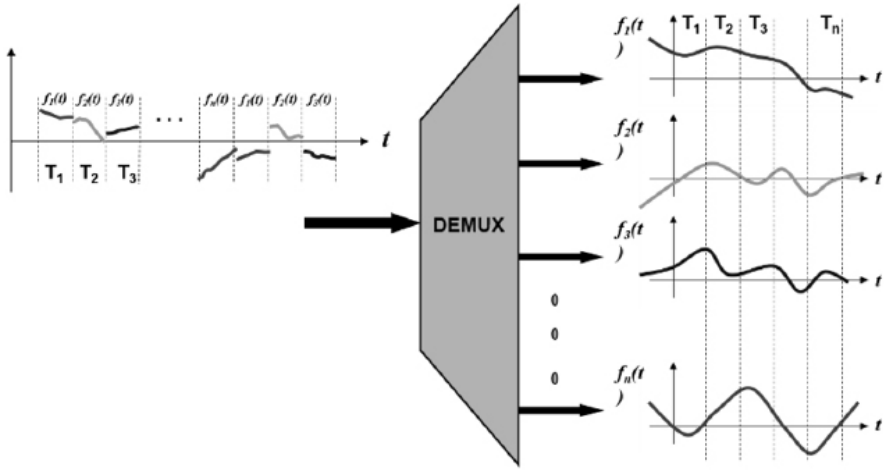


Fig. 46. Multicanalización por División del Tiempo de Señales Análogas II

3.3.4. Multicanalización y Desmulticanalización por División del Tiempo I

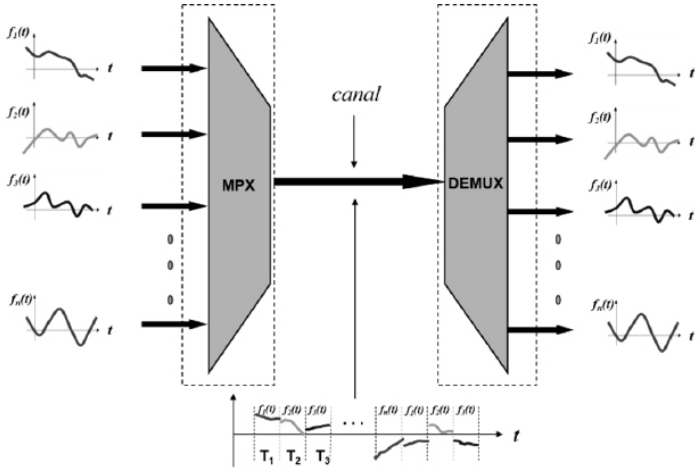


Fig. 47. Multicanalización y Desmulticanalización por División del Tiempo I

3.3.5. Muestreo de Señales Multicanal y Analógicas por División en el Tiempo

La señal analógica de división en el tiempo se muestrea de modo que la frecuencia de muestreo de cada señal debe cumplir los siguientes requisitos (Tomasi, 2003):

fm > 2 fmax.

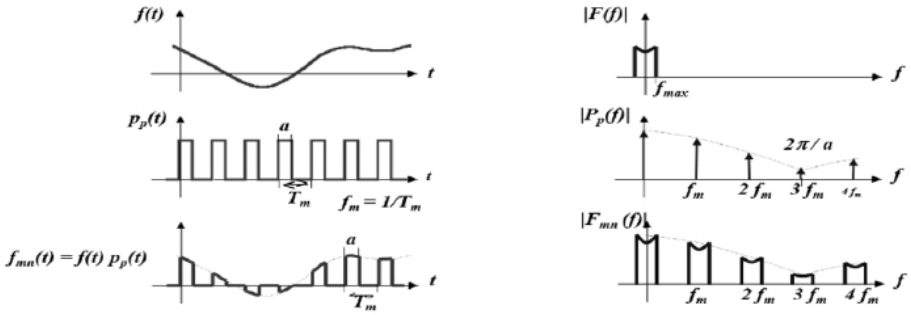


Fig. 48. Multicanalización por División del Tiempo y Muestreo de Señales Analógicas

3.3.6. Multicanalización por División del Tiempo de Señales Digitales I

En el multicanal de señales digitales, se controlan en su flujo (al transmitir o detener la transmisión) para que los canales coincidan correctamente.

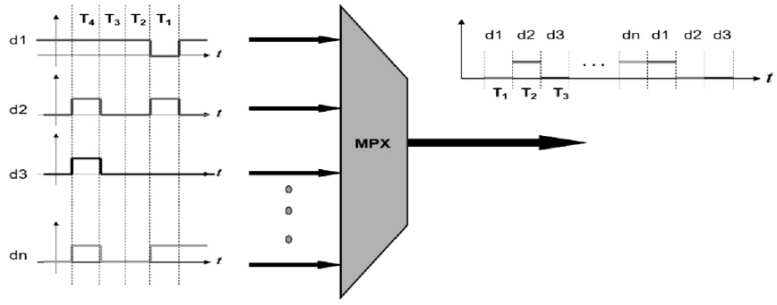
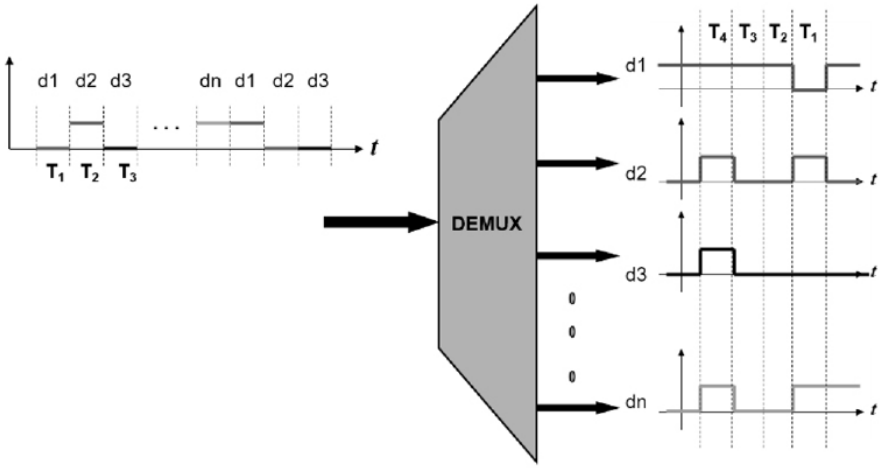


Fig. 49. Multicanalización por División del Tiempo de Señales Digitales I

3.3.7. Multicanalización por División del Tiempo de Señales Digitales II



3.3.8. Multicanalización y Desmulticanalización por División del Tiempo II

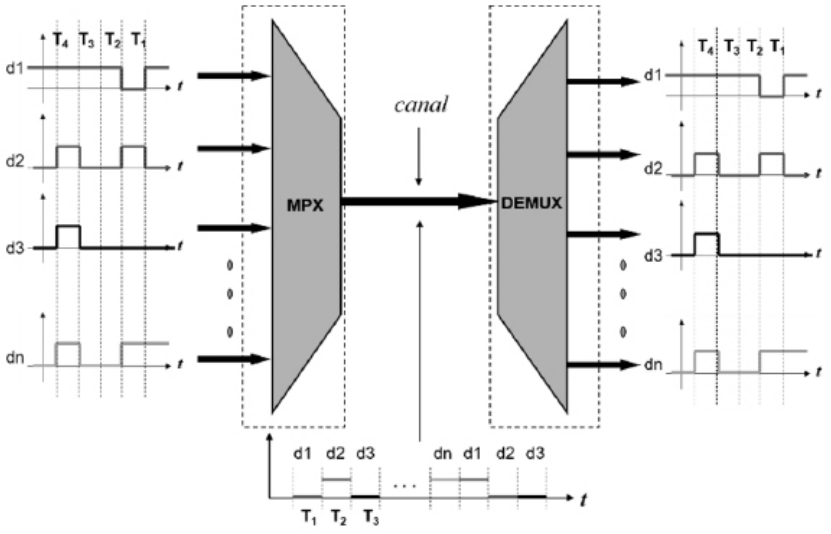


Fig. 51. Multicanalización y Desmulticanalización por División del Tiempo II

3.3.9. Multicanalizador de señales analógicas División en el Tiempo

Cada señal N se muestrea en un intervalo de tiempo distinto del de las demás señales y las muestras resultantes se suman para formar una única señal. (Medina Delgado et al., 2017)

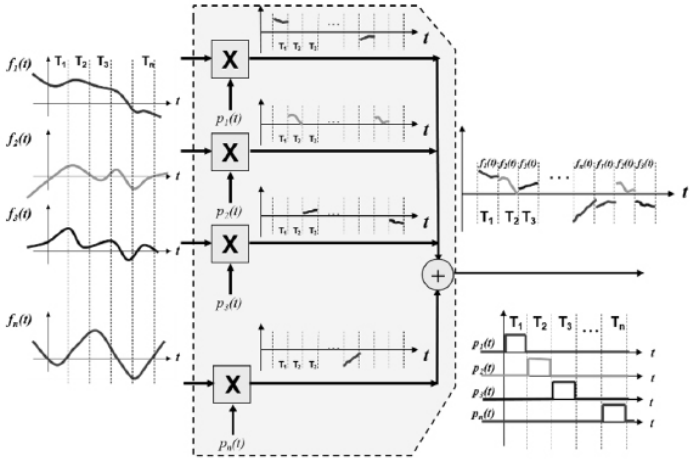


Fig. 52. Multicanalizador por División del Tiempo de Señales Analógicas

3.3.10. Desmulticanalizador por División del Tiempo de Señales Analógicas

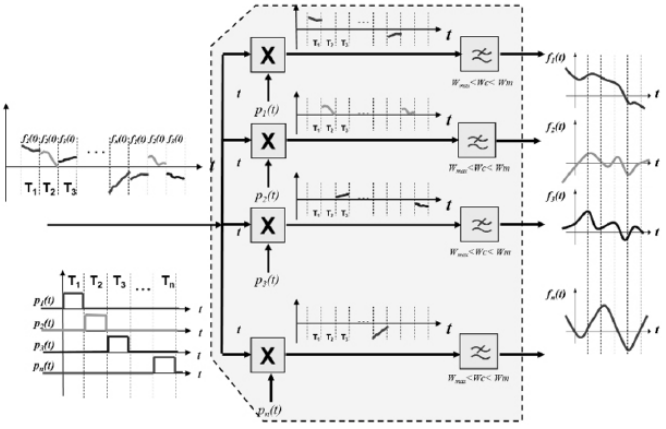


Fig. 53. Desmulticanalizador por División del Tiempo de Señales Analógicasmuestra de n señales.

3.3.11. Multicanalización por División del Tiempo de Señales Analógicas

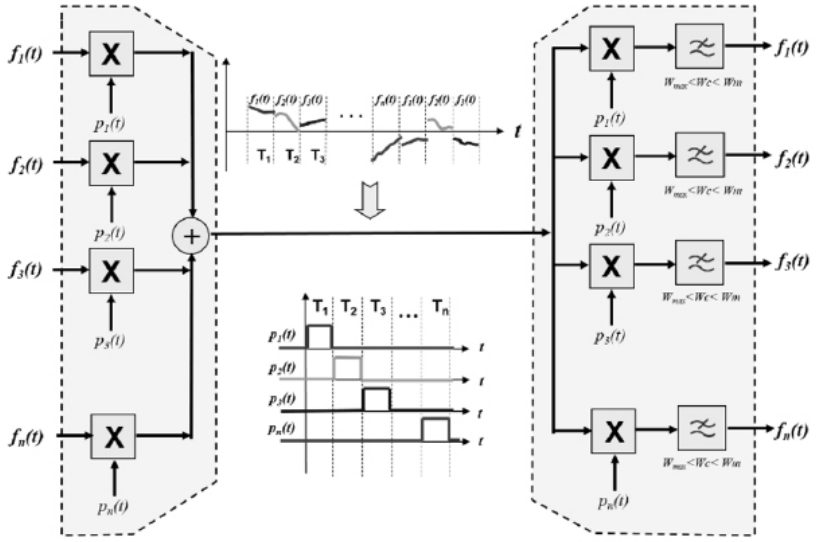


Fig. 54. Multicanalización por División del Tiempo de Señales Analógicas

CAPÍTULO 4

TRANSMISIÓN DE DATOS EN BANDA BASE, CODIFICACIÓN DE LÍNEA

Base Band Data Transmission, Line CodingResumen

Resumen

La transferencia de datos es el proceso básico de comunicación que consiste en transferir datos entre dispositivos. En la transmisión en banda base, la señal original se transmite directamente a la portadora sin ninguna modulación. La codificación de línea se utiliza para garantizar la integridad y precisión de la representación de los datos digitales en una señal de transmisión adecuada. Los datos digitales son datos binarios representados por 0s y 1s y las señales digitales son imágenes discretas de información. La velocidad de transmisión de datos se refiere al número de bits transmitidos por unidad de tiempo. Los elementos de datos son los bits individuales que componen un conjunto de datos. Los elementos de señal (digitales y analógicos) son los elementos que componen la señal transmitida. La velocidad de señalización es la velocidad a la que se transmiten los elementos de la señal. La interpretación de la señal se ve afectada por muchos factores, como la detección de errores del reloj del espectro de la señal y la inmunidad al ruido de interferencia de la señal. Todos estos factores afectan a la calidad y fiabilidad de la transmisión. Además, a la hora de implantar una solución de comunicaciones hay que tener en cuenta el coste y la complejidad del sistema de transmisión.

Palabras claves: Datos Digitales, Esquemas de Codificación, señal discreta, señal analógica, espectro.

Abstract

Data transfer is the basic process of communication that involves transferring data between devices. In baseband transmission the original signal is transmitted directly onto the carrier without any modulation. Line coding is used to ensure the integrity and accuracy of representing digital data into an appropriate broadcast signal. Digital data is binary data represented by 0s and 1s and digital signals are discrete images of information. Data rate refers to the number of bits transmitted per unit time. Data elements are the individual bits that make up a set of data. Signal elements (digital and analog) are the elements that make up the transmitted signal. Signaling rate is the rate at which signal elements are transmitted. Signal interpretation is affected by many factors such as signal spectrum clock error detection and signal interference noise immunity. All these factors affect the quality and reliability of transmission. In addition, the cost and complexity of the delivery system must be considered when implementing a communications solution.

Keywords: *Digital Data, Coding Schemes, discrete signal, analog signal, spectrum.*

4.1. Datos Digitales, Señal Digital

4.1.1. Señal Digital

Son eventos discretos, pulsos discontinuos de voltaje. Cada impulso es un elemento de señal. Los datos binarios se codifican en componentes de señal.

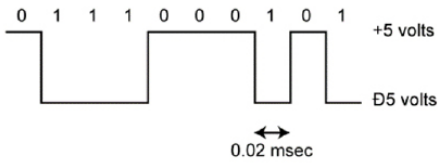


Fig. 55. Codificación. Fuente: Stallings DCC8e

4.1.2. Codificación

Datos digitales de una señal digital: Una señal digital es una serie de pulsos de tensión intermitentes discretos como se muestra en la Figura 55. Cada pulso es un elemento de señal. Los datos binarios se transmiten codificando cada bit de los datos en los componentes de la señal. En el caso más sencillo, existe una correspondencia uno a uno entre los bits y los componentes de la señal. Utilizar codificadores más sofisticados para mejorar el rendimiento cambiando el espectro de la señal y proporcionando capacidades de sincronización. En general, los equipos que codifican datos digitales en señales digitales son menos complejos y costosos que los equipos de modulación de digital a analógico. (Menso, 2020; Pierce & Michael, 1995; Danizio, 2020)

4.2. Algunos Términos

4.2.1. Unipolar

Todos los elementos de señal tienen el mismo signo.

4.2.2. Polar

El estado del "1" lógico es representado por un voltaje positivo y el otro por un voltaje negativo.

4.2.3. Elemento de Datos

Es un simple "1" o "0" binario (en bits).

4.2.4. Tasa de Datos

Está determinada por la capacidad de transmitir información representada en bits por segundo.

4.2.5. Duración o longitud de un bit

Tiempo tomado por el transmisor para emitir el bit.

4.2.6. Elemento de Señal

Es aquella parte de una señal que ocupa el intervalo más corto de un código de señalización.

4.2.7. Digital

Es un pulso de voltaje de amplitud constante.

4.2.8. Analógico

Es un pulso de frecuencia, fase y amplitud constante.

4.2.9. Tasa de Señalización

La tasa de señalización, también conocida como tasa de bits o velocidad de transmisión, se refiere a la cantidad de señales o símbolos que se transmiten por unidad de tiempo en un sistema de comunicación.

4.2.10. Tasa de Cambio de las señales en una Modulación

Tasa a la cual la señal cambia de niveles.

4.2.11. Medida en baudios

Son los elementos de señal por segundo.

4.2.12. Marca y Espacio

“1” Binario y el “0” Binario respectivamente.

4.2.13. Velocidad de Modulación

Velocidad a la que cambia el nivel de la señal, medida en baudios, elementos de señal por segundo. Depende del tipo de codificación digital utilizada

4.2.14. Temporización de los bits

Cuando ellos empiezan y cuando ellos terminan.

4.2.15. Factores que afecta la interpretación de las señales.

- La relación señal a ruido (S/N), decremento del BER
- Tasa de Datos, incremento del BER

- Bandwidth, incremento de la tasa de datos.
- Esquema de Codificación: Es el mapeo de los bits de datos a elementos de señal.

Las tareas involucradas en la interpretación de señales digitales en el receptor pueden resumirse como sigue. Primero, el receptor debe conocer la sincronización de cada bit, sabiendo con cierta precisión cuándo comienza y termina un bit. Ambos receptores deben decidir si la posición de cada componente de la señal es alta (0) o baja (1). Esto puede hacerse muestreando cualquier posición pequeña en el centro del rango y comparando el valor con un umbral. Pueden producirse errores debido al ruido y a otras perturbaciones. Como se ha visto, hay tres factores importantes: la relación señal/ruido, la velocidad de transmisión de datos y el ancho de banda. Otros factores coinciden con estos:

- Un aumento en la tasa de datos aumenta la tasa de error de bits (BER).
- Un aumento en SNR disminuye la tasa de error de bits.
- Un aumento en el ancho de banda permite un aumento en la tasa de datos.

Otro factor utilizado para mejorar el rendimiento es el esquema de codificación. Los esquemas de codificación asignan bits de datos a elementos de señal. Se han intentado muchos enfoques diferentes. Algunos de los más comunes se describen a continuación. (Cook, 1967; Couch, 2013; Danizio, 2019)

4.3. Comparación de los Esquemas de Codificación

- Espectro de señal
- Manejo de la señal de clocking
- Detección de errores

- Interferencia de señal e inmunidad al ruido
- Costo y complejidad

Antes de describir las diversas técnicas de codificación, considere las siguientes formas de evaluarlas o compararlas:

Espectro de señal: la falta de frecuencias altas reduce el ancho de banda requerido, la falta de componente de CC permite el acoplamiento de CA a través del transformador, proporcionando aislamiento, debe concentrar la energía en el medio del ancho de banda

Reloj: necesidad de sincronizar el transmisor y el receptor con un reloj externo o con un mecanismo de sincronización basado en la señal.

Detección de errores: sería útil que la codificación de la señal incluyera inmunidad: algunos códigos son mejores que otros.

Coste y complejidad: mayores velocidades de señal (y, por tanto, de datos) conllevan mayores costes. Algunos códigos requieren mayores velocidades de datos y requieren de requisitos de velocidad de señal más elevados.

4.3.1. Espectro de Señal

- La Falta de reducción de las altas frecuencias requerido en el bandwidth.
- La Falta de una componente DC es deseable; esto permite hacer acoples por medio de un transformador, y provee aislamiento. (Mahdi et al., 2023)
- Potencia concentrada en la mitad del bandwidth para eliminar la distorsión de señal.

4.3.2. Clocking

Mecanismo dispuesto para la Sincronización del transmisor y el receptor.

4.3.3. Reloj Externo

Disposición de Mecanismo de Sincronización basado en la señal.

4.3.4 Detección de Error

Puede ser construida en la codificación de la señal.

4.3.5. Interferencia de Señal e Inmunidad al Ruido

Algunos códigos son mejores que otros, Esto es medido por la BER.

4.3.6 Costo y Complejidad

Las tasas de señales más altas (& así las tasas de datos) indican que se pueden tener altos costos. Algunos códigos requieren de tasas de señal más grandes que la tasa de datos.

CAPÍTULO 5

TRANSMISIÓN DE DATOS

Data TransmissionResumen

Resumen

La transmisión de datos implica el intercambio de información entre dispositivos y los códigos de línea se utilizan para representar datos digitales en una señal adecuada para la transmisión. Algunas de las funciones del código lineal son funciones que garantizan la integridad de los datos y favorecen una recuperación precisa. Dos ejemplos de códigos lineales son los códigos AMI, que utilizan bits positivos y negativos para representar datos, y los códigos Manchester, que utilizan desplazamientos de fase para codificar bits. NRZ (No Retorno a Cero), NRZ-L (No Retorno a Nivel - Level), NRZI (No Retorno a Nivel Invertido), RZ (Retorno a Cero), B8ZS (Bipolar con 8 Ceros Alternos) y HDB3 (Alta Densidad de Bits 3) NRZ (no retorno a cero) NRZ-L (no retorno a nivel cero) NRZI (no retorno a nivel cero) RZ (retorno a cero), son códigos de línea; en tanto que B8ZS (positivo con 8 ceros alternos) y HDB3 (ánodo de alta densidad) son tipos de códigos de nivel 3. Cada uno tiene ventajas e inconvenientes en términos de eficacia y capacidad de detección de errores. En cuanto a la tecnología de transmisión, existe una técnica de modulación por salto de frecuencia que cambia rápidamente la frecuencia de transmisión para evitar interferencias. Y la secuencia directa que divide la señal en secuencias débiles y transmite simultáneamente en distintas frecuencias aumenta la seguridad de la transmisión y facilita la detección de errores.

Palabras clave: NRZ, NRZ-L, NRZI, RZ, B8ZS, HDB3

Abstract

Data transmission involves the exchange of information between devices and line codes are used to represent digital data in a suitable signal for transmission. Some of the functions in the line code are functions that ensure data integrity and promote accurate recovery. Two examples of linear codes are AMI codes which use positive and negative bits to represent data and Manchester codes which use phase shifts to encode bits. NRZ (non-return to zero) NRZ-L (non-return to zero level) NRZI (non-return to zero level) RZ (return to zero) , are line codes; while B8ZS (positive with 8 alternating zeros) and HDB3 (high density anode)are types of level 3 codes. Each has advantages and disadvantages in terms of efficiency and error detection capabilities. In terms of transmission technology there is a frequency hop modulation technique that rapidly changes the transmission frequency to avoid interference. And the direct sequence that divides the signal into weak sequences and simultaneously transmits on different frequencies increases the transmission security and facilitates error detection.

Keywords: NRZ, NRZ-L, NRZI, RZ, B8ZS, HDB3.

Para transmitir información digital, ésta debe representarse como señales. Como se denota en la Fig. 56.

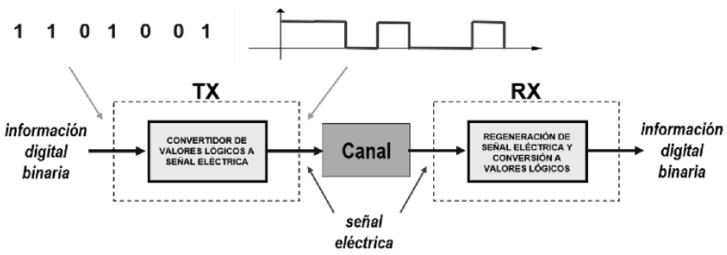


Fig. 56. Transmisión de información digital

Las distintas formas de representar la información digital como señales se denominan códigos de línea.

5.1 Códigos de Línea

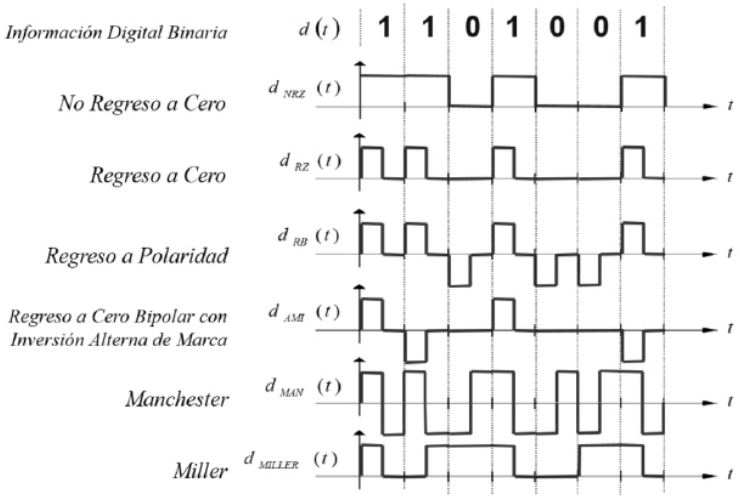


Fig. 57. Códigos de Línea

5.1.1. Función de código de línea.

- **Autosincronización:** El contenido adecuado de la señal de sincronización (reloj) permite una sincronización con precisión de bits.
- **Detección de errores:** Definición de código que incluye la capacidad de detectar errores y, en ocasiones, corregirlos. Inmunidad a las interferencias:
- **Capacidad de Detección:** Disposición de detectar el valor completo de una señal en presencia de ruido (baja probabilidad de error).
- **Densidad espectral de potencia:** El equilibrio entre el espectro de la señal y la respuesta en frecuencia de la línea de transmisión.
- **Ancho de banda:** Todo lo que hay que hacer es rellenar la señal de temporización (reloj) para conseguir una temporización de coincidencia de bits.

- **Transparencia:** La propiedad del código es independiente de la secuencia de transmisión de 1 y 0. (Buchman, 1962) (L., 1966) (Tomasi, 2003)

5.2 Código No Regreso a Cero (NRZ)

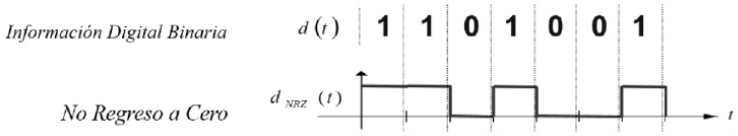


Fig. 58. Código No Regreso a Cero (NRZ)

$$D_{NRZ}(\omega) = A^2 T_b Sinc^2\left(\frac{\omega T_b}{2}\right)$$

$$B_{-3dB} \approx \frac{0.44}{T_b}$$

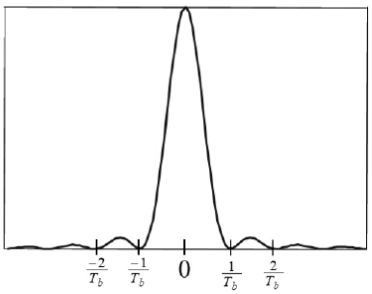


Fig. 59. Código No Regreso a Cero (NRZ)

5.2.1. Características del código NRZ o Non-Return-to-Zero

- No hay señal horaria en la autosincronización.
- Capacidad de detección de errores: No hay forma de identificar errores.

- Depende de la diferencia de tensión para la inmunidad al ruido.
- Densidad espectral de potencia: Alto contenido de energía en frecuencias inferiores a la velocidad de transmisión de datos, cercanas a 0. 95% de potencia. La frecuencia máxima de una señal puede utilizarse como norma para restringir su ancho de banda.
- Transparencia: El número de 1s y 0s en la señal determina su valor medio y si se puede ver el inicio de un bit. (Ramirez Viáfara et al., 2020)

5.3. Código Regreso a Cero (RZ)

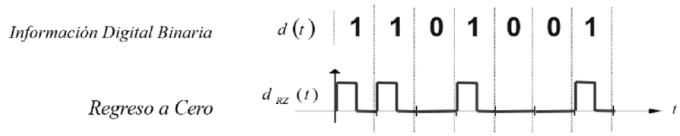


Fig. 60. Código Regreso a Cero (RZ)

$$D_{RZ}(\omega) = \frac{A^2 T_b}{16} Sinc^2\left(\frac{\omega T_b}{4}\right) + \frac{\pi 4^2}{8} \sum_{n=-\infty}^{\infty} Sinc^2\left(\frac{n\pi}{2}\right) \partial\left(\omega - \frac{2\pi n}{T_b}\right)$$

$$B_{-3dB} \approx \frac{0.88}{T_b}$$

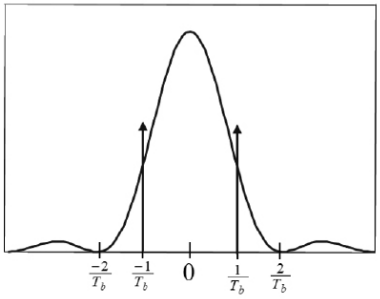


Fig. 61. Espectro del Código Regreso a Cero (RZ)

5.3.1. Aspectos destacados del Código de Regreso a Cero (RZ)

El código de Regreso a Cero (RZ) es un método de codificación utilizado en comunicaciones digitales y transmisión de datos. Aquí hay algunos aspectos destacados de este método:

Pulso de señalización definido: En RZ, la señal se codifica utilizando un pulso de señalización que retorna a cero en el centro de cada bit de datos. Esto significa que la señal siempre vuelve al nivel de referencia (cero) en el medio de cada bit.

Sincronización de reloj: Debido a que la señal regresa a cero en el medio de cada bit, RZ facilita la sincronización de reloj en el receptor. El receptor puede detectar transiciones de señal en el centro de cada bit para sincronizar la recepción de datos.

Eliminación de la ambigüedad de nivel: RZ elimina la ambigüedad de nivel, lo que significa que los niveles de señal se utilizan para representar directamente los valores binarios (generalmente 0 y 1). Esto facilita la detección de bits y reduce la posibilidad de errores causados por interpretaciones incorrectas de nivel.

Ancho de banda más amplio: Un inconveniente del RZ es que requiere un ancho de banda más amplio en comparación con otros métodos de codificación. Esto se debe a las transiciones frecuentes de señalización que ocurren en el pulso RZ.

Uso en aplicaciones específicas: RZ se utiliza en aplicaciones donde la sincronización y la eliminación de ambigüedad de nivel son cruciales. Por ejemplo, puede ser utilizado en sistemas de comunicación óptica y transmisión de datos de alta velocidad.

El código de Regreso a Cero (RZ) es un método de codificación que se caracteriza por su sincronización de reloj efectiva y eliminación de la ambigüedad de nivel. Aunque tiene un ancho de banda más amplio, es adecuado para aplicaciones específicas donde estas características

son importantes. (Enrique, 2004; Romero et al., 2016) (Ramirez Viáfara, et al., 2020)

5.4. Código Regreso a Polaridad (RB)

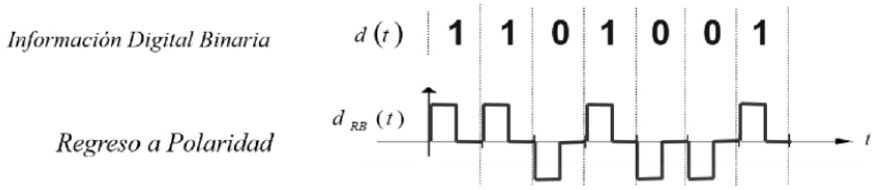


Fig. 62. Código Regreso a Polaridad (RB)

$$D_{RB}(\omega) = \frac{A^2 T_b}{4} Sinc^2\left(\frac{\omega T_b}{4}\right)$$

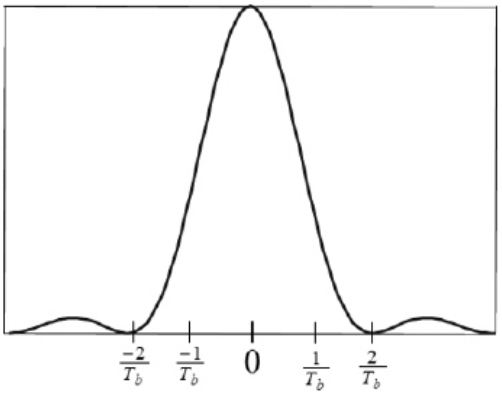


Fig. 63. Código Regreso a Polaridad (RB)

5.4.1. Características de Código Regreso a Polaridad

Sincronización automática: Si hay señales de sincronización

Capacidad de detección de errores: Sin posibilidad de detección de errores

Mayor inmunidad al ruido: Lograda mediante el uso de tensiones positivas y negativas.

Característica energética: Sin contenido energético en cero en la densidad espectral de potencia. más expansivo que NRZ.

Transparencia: Independientemente de los valores de información, se mantiene la autosincronización.

5.5 Código AMI

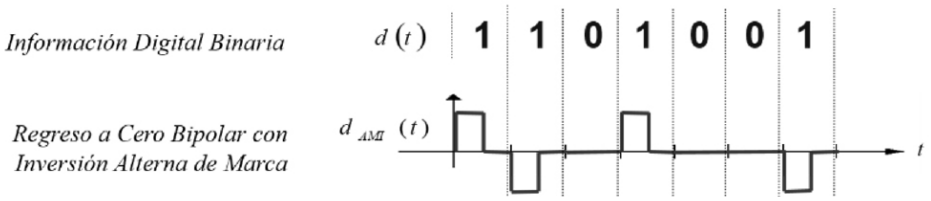


Fig. 64. Código AMI

$$D_{RB}(\omega) = \frac{A^2 T_b}{4} Sinc^2\left(\frac{\omega T_b}{4}\right) sen^2\left(\frac{\omega T_b}{2}\right)$$

$$B_{-3dB} \approx \frac{0.71}{T_b}$$

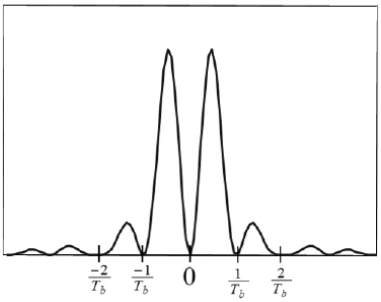


Fig. 65. Espectro Código AMI

5.5.1. Características Código AMI

Autosincronización: En caso de que contenga un indicador de sincronización.

Detección de errores: Permite descubrir ciertos tipos de errores.

Inmunidad al ruido: Insusceptibilidad mediante la utilización de tensiones positivas y negativas. (Proakis & Salehi, 2002)

Control del grosor fantasmal: Ninguna sustancia vital cercana a 0. Velocidad de transferencia inferior a RB.

Sencillez: La estimación de la bandera normal depende del número de 0's. La autosincronización se pierde si se transmite un gran número de 0. En cualquier caso, se puede utilizar un tipo de codificación de la información para evitarlo, por ejemplo, HDB3 (señalización bipolar de alto grosor 3), en la que los arreglos de más de tres ceros secuenciales se sustituyen por unos pocos valores conocidos. (Tropena, 2006)

5.6 Código Manchester

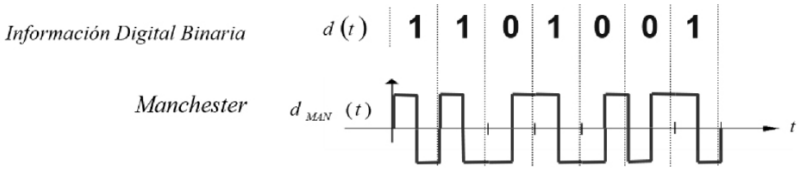


Fig. 66. Código Manchester

$$D_{MANCHESTER}(\omega) = A^2 T_b Sinc^2\left(\frac{\omega T_b}{4}\right) sen^2\left(\frac{\omega T_b}{4}\right)$$

$$B_{-3dB} = \frac{1.16}{T_b}$$

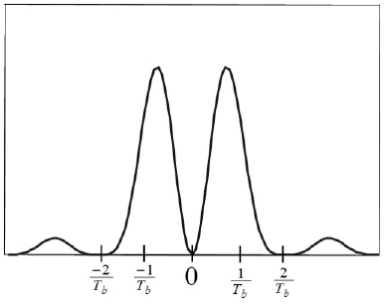


Fig. 67. Espectro de Código Manchester

5.6.1. Características Código Manchester

Autosincronización: Si contiene señal de temporización

Capacidad de detección de errores: Permite detectar cierto tipo de errores

Inmunidad al ruido: Mayor inmunidad al ruido al emplear voltajes positivos y negativos.

Densidad espectral de potencia: No tiene contenido de energía cercano a 0. Doble ancho de banda que AMI. (Stremler, 2008)

Transparencia: La autosincronización se mantiene independientemente del valor de la información.

5.7. Tipos De Codificación (TTL)

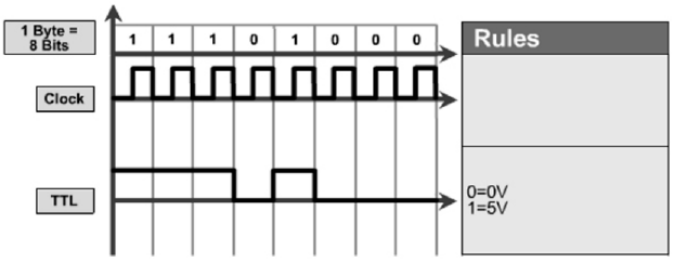


Fig. 68. Tipos de Codificación (TTL)

5.7.1 Tipos De Codificación (NRZ-L, I)

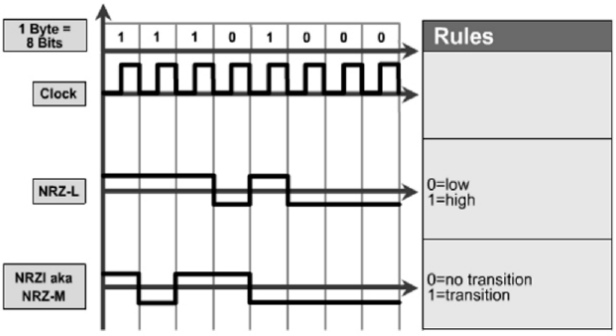


Fig. 69. Tipos de Codificación (NRZ-L)

5.7.2. Tipos De Codificación (Manchester)

Provee sincronismo, pero no detección de errores. Es utilizado en Ethernet.

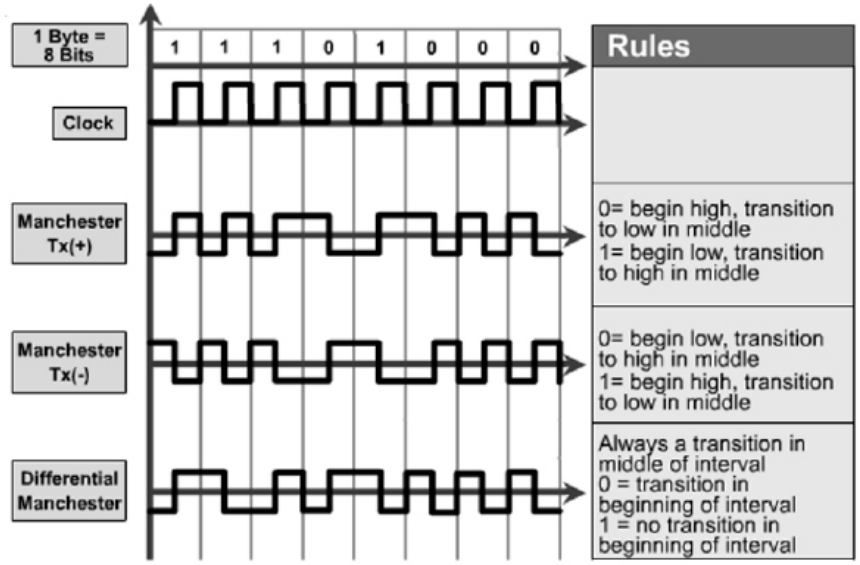


Fig. 70. Tipos de Codificación (Manchester)

5.7.3. Tipos De Codificación (MLT-3)

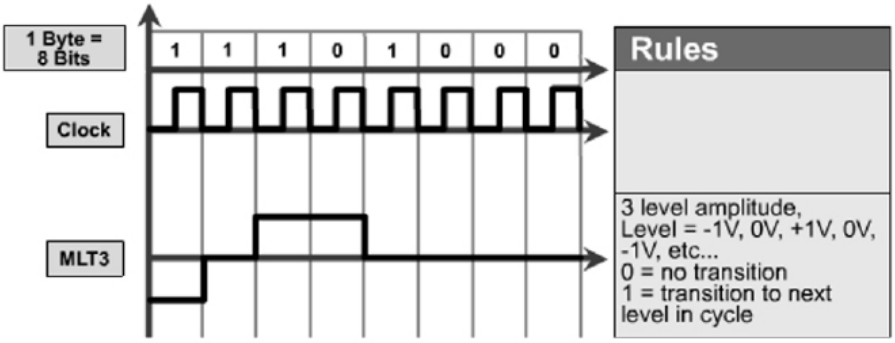


Fig. 71. Tipos de Codificación (MLT-3)

5.8 Saltos de Frecuencia

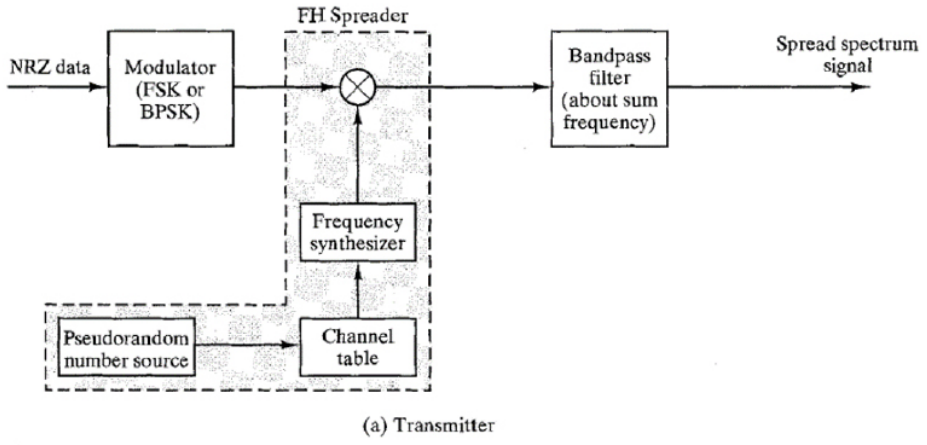


Fig. 72. Saltos de Frecuencia Transmisor

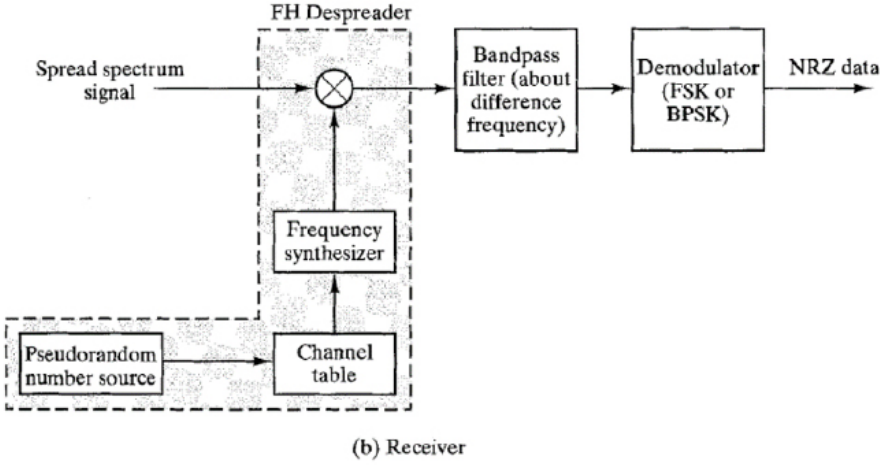


Fig. 73. Saltos de Frecuencia Receptor

5.9. Secuencia Directa

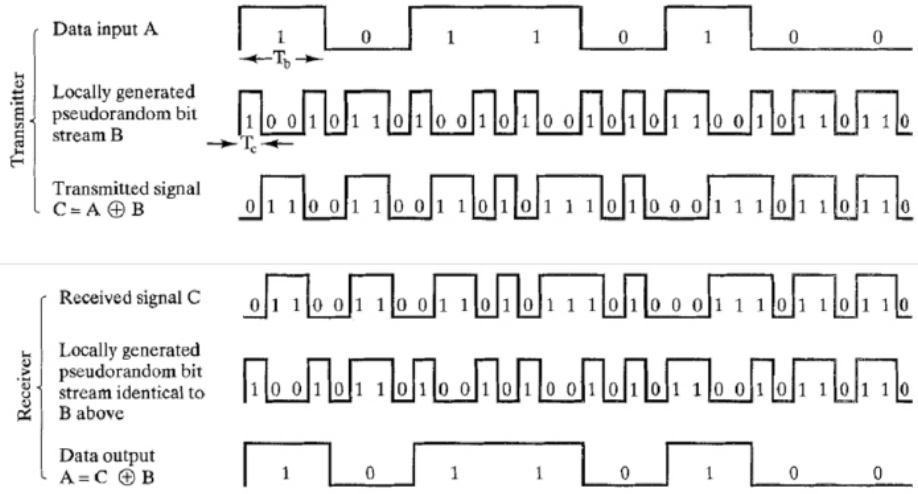


Fig. 74. Saltos de Frecuencia Receptor

CAPÍTULO 6

CODIFICACIÓN DE CANAL

Channel Coding

Resumen

La codificación de canales es una técnica utilizada para proteger la información durante la transmisión y reducir los efectos no deseados, como el ruido y las interferencias, que pueden afectar a la calidad de la señal. La probabilidad de error es una medida de la fiabilidad de la transmisión que indica la probabilidad de que se produzca un error al recibir los datos. Las técnicas de control de errores se basan en identificar la redundancia de los datos para poder detectar y corregir los errores en el momento en que se producen. Una forma habitual de proteger la información es repetir cada bit de información dos veces para que los errores puedan detectarse y corregirse más fácilmente. Los códigos de detección y corrección de errores se utilizan para comprobar si se ha producido un error durante la transmisión y, en caso afirmativo, corregirlo o solicitar un reenvío de los datos. Los códigos de bloqueo, como los códigos de paridad cuadrada o los códigos de paridad cruzada, son ejemplos de códigos utilizados para la detección de errores. El código algebraico es otro tipo de código que permite detectar y corregir errores. Los códigos cíclicos son una clase especial de códigos algebraicos que presentan propiedades adicionales que simplifican la implementación de codificadores y descodificadores. La teoría establece las condiciones para generar códigos cíclicos con capacidades específicas de corrección de errores. La implementación de un código cíclico utiliza hardware dedicado para realizar el proceso de descodificación mediante codificadores y decodificadores. El resto de la tabla de escritura se calcula para determinar los porcenta-

jes utilizados en el proceso de escritura. Además de los códigos anteriores, se han utilizado otros códigos en diversas aplicaciones, como los códigos Reed-Solomon Turbo LDPC. (Parity-Check-Less-Density) con sus propias funciones y capacidades de corrección de errores. Estos códigos desempeñan un papel fundamental en la mejora de la fiabilidad de la transmisión y la seguridad de los datos en diversas aplicaciones de comunicación y almacenamiento.

Palabras clave: Codificación de Canales, Probabilidad de Error, Control de Errores, Paridad, código algebraico.

Abstract

Channel coding is a technique used to protect information during transmission and reduce unwanted effects such as noise and interference that can affect signal quality. Error probability is a measure of transmission reliability that indicates how likely an error is to occur when receiving data. Error control techniques rely on identifying data redundancy so that errors can be detected and corrected as they occur. A common way to protect information is to repeat each bit of information twice so that errors can be more easily detected and corrected. Error detection and correction codes are used to check if an error has occurred during transmission and if so to correct it or request a resend of the data. Blocking codes such as parity codes square parity codes or cross parity codes are examples of codes used for error detection. Algebraic code is another type of code that allows error detection and error correction. Cyclic codes are a special class of algebraic codes that exhibit additional properties that simplify the implementation of encoders and decoders. The theory sets the conditions for generating cyclic codes with specific error-correcting capabilities. A cyclic code implementation uses dedicated hardware to perform the decoding process using encoders and decoders. The rest of the writing table is calculated to determine the percentages used in the writing process. In addition to the above codes other codes have been used in various applications such as the Reed-Solomon Turbo LDPC co-

des. (Parity-Check-Less-Density) with their own functions and error correction capabilities. These codes play a key role in improving transmission reliability and data security in various communication and storage applications.

Keywords: *Channel Coding, Probability of Error, Error Control, Parity, algebraic code.*

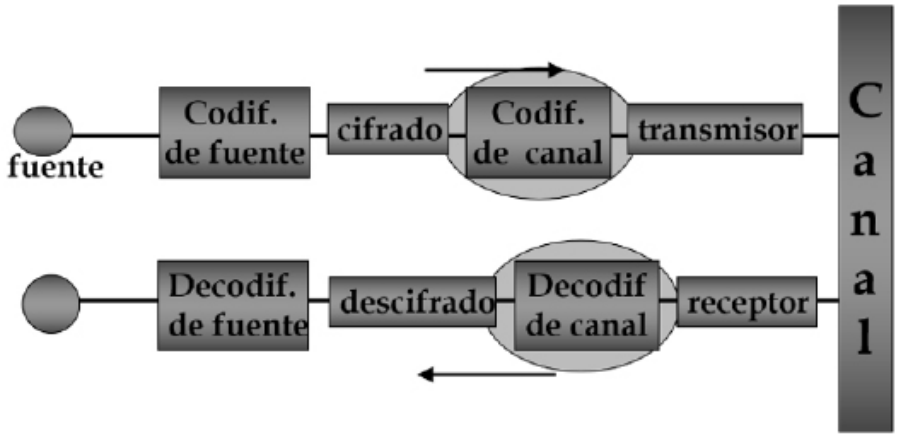


Fig. 75. Codificación de Canal

Saltando la etapa de cifrado que se estudiará en la asignatura de Seguridad de Redes y Sistemas, la siguiente etapa es la codificación de canal, que tiene como objetivo introducir redundancia en la secuencia transmitida acorde a una regla de código con la cual se pueda detectar o corregir errores, primero se extrae toda la redundancia posible en la codificación de la fuente y después se introduce redundancia en la codificación de canal. (Stallings, 2004)

6.1. Efectos Indeseables de la Transmisión

En la transmisión de una señal analógica la fidelidad de la señal recibida se caracteriza por la Relación Señal a Ruido (S/N), mientras que en una señal digital se caracteriza por la Pe. O sea, por la probabilidad

de que habiendo sido transmitido un “1” se reciba un “0” o lo inverso. (Tanenbaum, 2003)

Recuerden que este gráfico se refiere es a una representación no rigurosa de los efectos indeseables por cuanto la atenuación no es la misma para todos los contenidos de frecuencias, lo que determina la existencia de la distorsión.

En la Figura 75 se ve la transmisión de un “1” que es interpretado como un cero en el receptor y por tanto ocurre un error. (Tanenbaum, 2003; Tomasi, 2003)

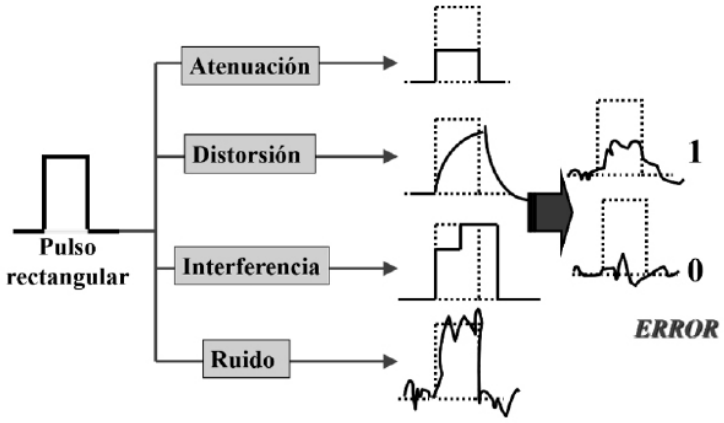


Fig. 76. Efectos indeseables de la transmisión

6.2 Probabilidad de Error

1. Depende de las técnicas y energía empleadas para la transmisión, de las características del medio de transmisión y de las señales indeseables.
2. Valores típicos de Pe son 10- 6, 10- 7, 10-10 etc.
3. Para aplicaciones donde los errores son intolerables resulta necesario emplear técnicas de control y recuperación de los errores.

6.3. Fundamentos de las técnicas de control de errores

A continuación, una secuencia de procedimientos por los cuales se pueden detectar y/o corregir errores que tiene valor solamente didáctico y están presentados para que se conozcan los fundamentos de estas técnicas pero que no se constituyen en códigos empleados en la práctica, como otros que se estudiarán con posterioridad.

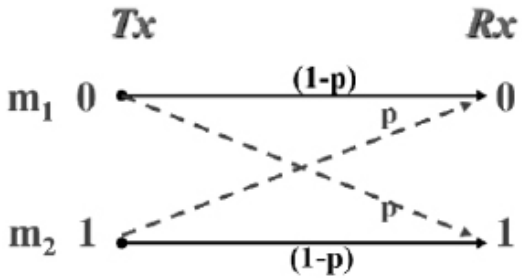


Fig. 77. Ocurrencia de un error en la transmisión

Se tienen dos mensajes m1 y m2 y para su representación se usan los dígitos “1” y “0”.

El canal representado tiene una probabilidad (1-p) de que lo recibido coincida con lo transmitido y otra p de que ocurra error. Si ocurre un error en la transmisión esto no podrá ser detectado en el receptor y se producirá un error no detectado en el receptor.

6.4. Recurso para proteger la información

Si por el contrario ante los mismos mensajes m1 y m2 yo los representara para la transmisión por las secuencias “00” o “11” respectivamente, se está agregando un dígito redundante que cumple la regla de ser igual al dígito de información. Las únicas secuencias posibles para transmitir serían las que cumplen la regla y ante cualquier secuencia “01” o “10”, se sabría que son el resultado de la ocurrencia de un error en la transmisión y se podría detectar la ocurrencia de errores simples, si hay un error doble no se detecta. (Sundberg, 1986)

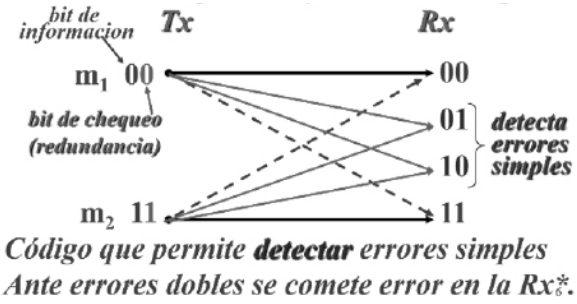


Fig. 78. Regla para protección contra errores

Pregunta: Si p es la probabilidad de no error en un dígito y q la de error, y suponiendo un canal Binario simétrico con independencia estadística calcule en cuanto disminuye la probabilidad de error.

6.5 El bit de información se repite dos veces

Si por el contrario cada dígito de información se transformara en una palabra de código en que el dígito se repitiera 3 veces, se tendría que para transmitir un "0" de información usaría la secuencia 000, mientras que, en receptor, siempre que la cantidad de 0s recibidos sea superior a la de "1", por un criterio mayoritario se decodificaría un "0" y lo inverso.

Las palabras significadas como separadoras son las que aparecen indicando la ocurrencia de un error. En este caso pueden ser detectados y corregido todos los errores simples y detectados, pero no corregidos los errores dobles. (Sundberg, 1986)

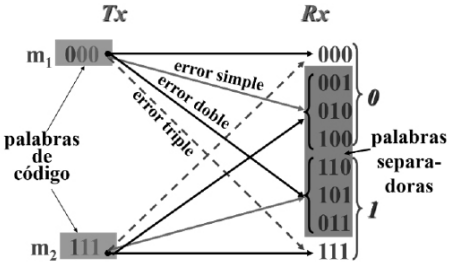


Fig. 79. Código que permite corregir errores simples

Conclusión: La corrección de errores requiere más redundancia que la detección. Se calculan los dígitos de chequeo de acuerdo con la regla, en el receptor se comprueba la regla y se detecta/corrigen los errores.

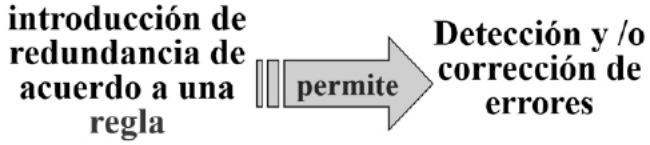


Fig. 80. Corrección de errores

6.6. Códigos detectores y correctores de errores

Del transmisor solo se emiten palabras de código, no obstante, la ocurrencia de errores en la transmisión dará lugar a la recepción de palabras separadoras. Siempre que se reciba una palabra separadora se conocerá la presencia de error, el que podrá ser o no corregido en el receptor de acuerdo con el grado de redundancia incorporado por el código. En los códigos correctores de errores, ante la recepción de cada palabra separadora está decidida cual es la palabra de código que será interpretada en el receptor. (Tomasi, 2003; Moparthi et al., 2023)

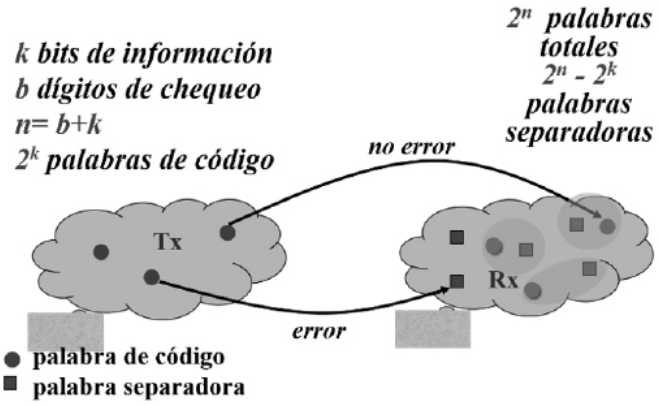


Fig. 81. Códigos detectores y correctores de errores

6.6.1. Espacio de Codificación

- Espacio de n dimensiones donde cada palabra es representada por un punto.
- Distancia entre palabras: cantidad de segmentos quebrados entre dos palabras.
- Distancia entre palabras: cantidad dígitos diferentes.

Concepto válido y extensible a n dimensiones, en el que estará representadas por puntos la n palabras posibles a formarse con n dígitos binarios.

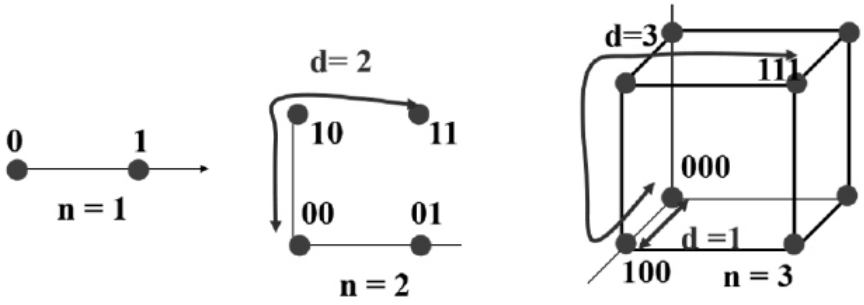


Fig. 82. Espacio de codificación

6.6.2 Distancia entre Palabras

Cantidad de dígitos diferentes

V = 1 1 1 1 0 0 0

U = 1 1 0 0 0 1 1

d=4

La potencialidad para detectar o corregir errores de un código depende de la distancia mínima entre las palabras de códigos.

Potencialidad de un código dependiendo de la distancia mínima entre dos palabras de código. Esto es, representando una pequeña parte del espacio de codificación y significando por rojas las palabras de códigos y por azules las separadoras, se puede analizar que:

Con d=1, se transmite una palabra de código y ante un error en un bit se recibe una palabra con un dígito diferente, o sea a distancia 1 que es también palabra de código. O sea, NO se detecta la ocurrencia del error. (Carlson, 2007; Pérez Santacruz, 2022)

Con d=2, Ante un error simple se recibe una palabra separadora, que no cumple la regla del código y se puede detectar la ocurrencia de este.

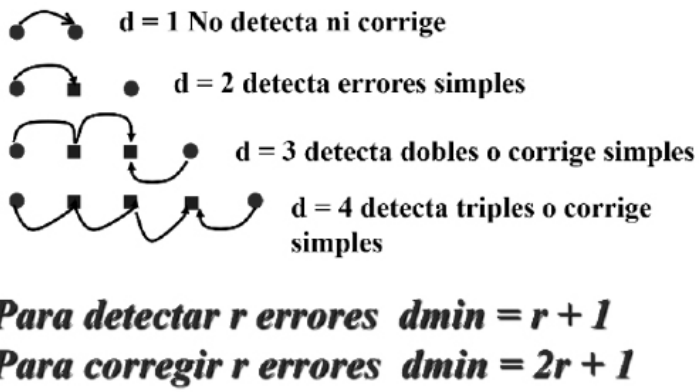


Fig. 83. Distancia entre Palabras

Con d=3, ante un error simple en un código corrector de errores se recibe una palabra separadora que tiene definida su palabra de código más cercana que será la interpretada en la recepción. De igual forma se detectan, sin corregirse la ocurrencia de errores dobles. Igual razonamiento puede extenderse para d=4 y para obtener la generalización de las distancias mínimas para la detección y corrección de r errores. (Carlson, 2007)

6.6.3. Límite de Hamming

Las relaciones entre distancia mínima entre palabras de códigos y las potencialidades de estos no refleja regla matemática alguna que permita calcular la cantidad de dígitos de chequeo para la corrección de r errores a partir de la cantidad de dígitos de información de la palabra codificada. Esto lo determina el límite de Hamming.

Fig. 84. Límite de Hamming

La expresión del límite de Hamming se determina a partir de representar un espacio de codificación n dimensional.

Si el código es corrector de r errores, cada palabra de código se puede considerar en el centro de una esfera en la que se encontrará rodeada de las palabras separadoras asociadas. La esfera ha de tener radio r para que cualquier error de multiplicidad r dé lugar a una palabra de código dentro de la esfera y el error pueda ser corregido.

Analizando cada esfera, la cantidad de palabras totales que debe contener deben ser:

1 (la palabra de código) + n palabras separadoras a distancia 1 de la palabra de código + todas las palabras separadoras de distancia 2 de la palabra de código +... Todas las separadoras de distancia r de la pa-

labra de código. De forma que la expresión da el número total de palabras en cada esfera de radio r y se conoce que hay 2k esferas en el espacio de codificación. (Carlson, 2007)

Esfera de radio r con centro en palabra de código.

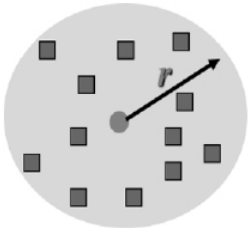


Fig. 85. Análisis de cada esfera, la cantidad de palabras totales

Cantidad en cada esfera:
1: Palabra de cada código
n: Palabras separadas a distancia 1

$\binom{n}{r}$: *Palabras a distancia r* $\qquad$ $\binom{n}{2}$: *Palabras a distancia* 2

$$Palabras\ en\ una\ esfera = 1 + n + \binom{n}{2} + \cdots \binom{n}{r}$$

6.6.4. Relación entre k, n y b para Corrección de r Errores

El número total de palabras en el espacio de codificación debe ser el producto del número de palabras de códigos (igual al número de esferas dentro del espacio) multiplicadas por el número de palabras dentro de cada esfera, calculado anteriormente. Ese número de palabras totales, para que el código pueda existir debe ser menor que 2n. Y despejando 2k, se extrae la expresión resaltada que da una relación entre k, r y n en un código corrector de r errores que recibe el nombre de Límite de Hamming. (Romero et al., 2016)

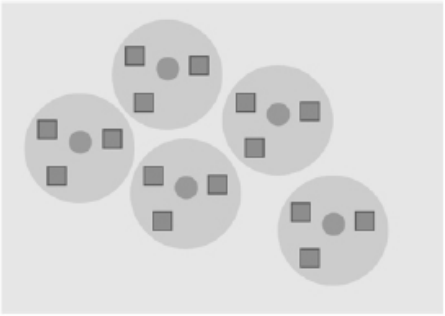


Fig. 86. Relación entre k, n y b para corrección de r errores

$$n = k + b$$

$$2^n \geq 2^k \left[1 + n + \binom{n}{2} + \binom{n}{3} + \cdots \binom{n}{r}\right]$$

$$2^k \leq \frac{2^n}{\left[1 + n + \binom{n}{2} + \binom{n}{3} + \binom{n}{4}\right]}$$

6.6.5. Caso Particular de Corrección de Errores Simples

Se aprecia en este caso que a medida que k aumenta, la cantidad de dígitos de chequeo a introducir en la palabra codificada por cada dígito de información (b/n), disminuye.

$$r = 1$$

$$2^k \leq \frac{2^n}{n+1}$$

$$2^b \geq n + 1$$

$$si\ k \uparrow \quad {}^{b}/_{n} \downarrow$$

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b	2	3	3	3	4	4	4	4	4
n	3	5	6	7	9	10	11	12	13

6.7. Códigos de Bloque

Los códigos de bloques tienen un proceso de codificación en el que la regla del código da las herramientas para calcular cuales son los b dígitos de chequeos, a partir de los k dígitos de información, para dar lugar a una palabra codificada de n dígitos. (Danizio, 2020)

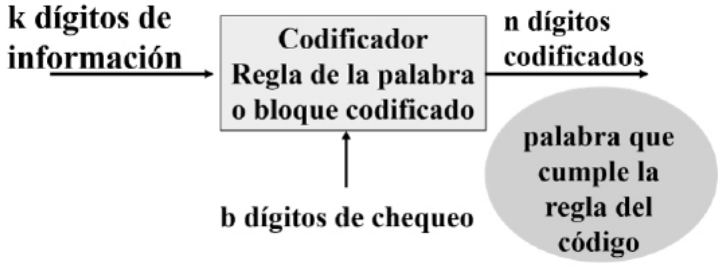


Fig. 87. Códigos de bloque

6.8. Código de Paridad

Ejemplos de códigos de bloques: Código de paridad

Aprecie que la regla de código "la palabra codificada contiene un número par de "1"" puede expresarse a través de la ecuación matemática que se brinda, en la que la operación matemática expresada es la suma módulo 2, también referida como operación lógica de OR exclusivo o XOR, cuya regla expresa la diapositiva. (Blake, 2006)

Esta codificación permite detectar cualquier error de multiplicidad impar que ocurra. ¿Por qué? Represéntese un esquema del espacio de codificación para este código. (Proakis & Salehi, 2002)

Regla: El número de "1" de la palabra es PAR.

$$\begin{array}{ccccccc} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ x_1 & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & x_6 c_1 \end{array}$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_6 + c_1 = 0$$

$$Suma\ módulo\ 2 = \begin{array}{l} 1+1=0 \\ 1+0=1 \\ 0+1=1 \\ 0+0=0 \end{array}$$

6.9. Código Rectangular o de Paridad Cruzada

Consiste en tener bits de paridad en cada carácter y tras un número determinado de caracteres, incluir un carácter enteramente formado de los bits de paridad calculados de forma vertical en la secuencia de caracteres. Este código es más potente que el anterior, introduce mayor redundancia. Pero es poco usado por la existencia de otros con mejores características. (Tanenbaum, 2003; Mulaosmanovic, 2020)

- El código de paridad brinda pobre protección.
- Puede aumentarse su protección empleando paridad cruzada.

$$\begin{array}{ccccccc} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & \mathbf{1} \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & \mathbf{0} \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & \mathbf{0} \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} \\ \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{array}$$

Bits de paridad horizontal

Bits de paridad vertical

6.10. Códigos Algebraicos

Los códigos algebraicos son aquellos en las que la regla del código se expresa a través de una ecuación matricial del tipo señalado, H. T=0. Donde H es la matriz del código y T es la secuencia transmitida, expresada en forma de vector columna. La operación de suma implícita en la ecuación es del tipo módulo 2. Observe que el código de paridad par es un caso particular de código algebraico. Determine la matriz H para el código de paridad. (Miller, 2002)

Una regla está definida por un conjunto de ecuaciones que determinan el dígito de control de la solución. Visualización en formato matricial:

$$H_{bxn} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & \dots h_{2n} \\ h_{b1} & h_{b2} & h_{bn} \end{bmatrix} \qquad T_{nx1} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_m \\ c_1 \\ \dots \\ c_b \end{bmatrix}$$

$$H * T = 0$$

6.11. Códigos algebraicos para la corrección de errores simples

Para el caso particular de códigos correctores de errores simples, H debe cumplir las condiciones planteadas, en las que la última es deseable pero no obligatoria. (Proakis & Salehi, 2002)

Analice, partiendo del conjunto de b ecuaciones lineales que se forman de la ecuación matricial H.T=0, el porqué de 1.

Condiciones de H

- b filas y n columnas.
- Ninguna columna entera de ceros.

- Todas las columnas diferentes.
- Los dígitos de chequeo en las posiciones de las columnas que contienen un único “1”.

6.12. Códigos Algebraicos

El principio de detección y/o corrección de errores es el hecho de que la matriz Síndrome es igual al producto H.R e igual a la vez a H.E, donde E es el vector ERROR, que representa un vector columna de n dígitos, con “1” en las posiciones del error y ceros en las restantes. (Sundberg, 1986). Analice el ejemplo propuesto en el documento problemas Tema 3 y realice el Trabajo independiente indicado.

R: Palabra recibida, en el receptor se determina:

$$¿\ H \cdot R = 0\ ?$$

$H \cdot R = 0$ No hay error detectado

$H \cdot R \neq 0$ Hay error y este puede detectarse o corregirse según la redundancia del código.

$R = T + E \qquad H \cdot R = H \cdot (T + E) = H \cdot E = S$

S: *Matriz Síndrome*, distintivo de la posición del error en códigos correctores.

6.13. Códigos Cíclicos

Subclase de códigos algebraicos con propiedades particulares:

1. Capacidad de detectar o corregir errores según redundancia.
2. Particularmente eficiente en detección de ráfagas de errores.
3. Fácil codificación y decodificación.
4. Caracterizados por un polinomio generador P(x) de grado b.

Los puntos 2 y 3 lo hacen que sea muy empleado en la transmisión de datos.

Representación polinómica de secuencias

1 0 1 1 0 1 ==> $x5 + x3 + x2 + 1$

G(x): Secuencia de k dígitos de información

F(x): Palabra codificada.

Regla del código cíclico: Toda palabra del código es divisible (sin residuo) entre el polinomio generador.

Esto indica que las palabras separadoras NO serán divisibles entre P(x) y la detección del error puede hacerse al practicar la división de la palabra recibida entre P(x) y determinar si el residuo es o no cero. Si es cero, se dice que lo recibido no tiene error. (Menso, 2020) (Trojovskỳ & Dehghani, 2022).

6.14. Proceso de Codificación

Para llegar al proceso que dé lugar a las palabras F(x) que cumplan lo de ser divisibles entre P(x), la secuencia de operaciones es mostrada por la diapositiva. Partiendo de la Expresión de G(x), secuencia de dígitos de información, se multiplica esta por x^b, donde b es la cantidad de dígitos de chequeos.

Después ese producto se divide entre P(x) y se obtiene un cociente Q(x) y un residuo de la división R(x). La palabra codificada es la secuencia indicada en 4, por cuanto como se demuestra en 3, esa expresión es divisible (sin residuo) entre el polinomio generador P(x). (Pinto García, 2015)

1. $G(x)x^b$ Agregar b ceros a la secuencia de información.

2. $\frac{G(x)\ X^b}{P(x)} = Q(x) + \frac{R(x)}{P(x)}$

3. $\frac{G(x)\,x^b+R(x)}{P(x)} = Q(x)$

4. $F(x) = G(x)\,xb + R(x)$ Palabra codificada

6.15. Propiedades de Códigos Cíclicos

P(x) no puede tener a x como factor común. ¿Por qué? De ser así Todas las palabras de código terminarían en cero y ese bit no tendría valor. (Carlson, 2007; Tomasi, 2003)

6.16. Teoremas de Códigos Cíclicos

1. P(x) con varios términos representa un error simple. Los errores simples se expresan en 1 o xi y es evidente que no son divisibles por polinomios con más de un término.

2. No existe ningún polinomio que divida (x + 1) por un número impar de términos. Por lo tanto, si P(*x*) (*x de* 1) es un factor común, se puede identificar cualquier combinación de errores anómalos.

3. Cualquier polinomio divisible entre (x+1), contiene a (x + 1) como factor común. Asuma que E(*x*) tiene a (*x* +1) como factor común, quiere decir que E(*x*) = (*x* + 1) Q(*x*). Si se evalúa E (1) = (1 + 1) Q (1) = 0 *x* Q (1) = 0, lo que equivale a que E(x) tiene un numero par de términos. O sea, todo polinomio que tenga a (*x* + 1) como factor común tiene un número par de términos. Conclusión cualquier polinomio error con un número impar de términos no es divisible entre (*x* + 1).

4. Cualquier código cíclico generado por un polinomio de grado b, es capaz de detectar todas las ráfagas de longitud b o menor.

$$L \leq b.$$

Una ráfaga de largo b se representaría por:

$$E(x) = x^i (x^{b-1} + x^{b-2} + \ldots + 1)$$

P(x) no tiene a x como factor común y además el segundo término es de grado b-1, no divisible entre P(x). Este es uno de los

teoremas más importantes y que ponen en evidencia la potencialidad de los códigos cíclicos de detectar ráfagas de errores.

No solo son capaces de detectar cualquier ráfaga de largo b o menor, sino que detectan un alto por ciento de las ráfagas de longitud mayor. Demostración en Tanenbaum, epígrafe 3.2.

5. Se dice que un polinomio P(x) tiene exponente e si e es el menor número entero positivo divisible por P(x). Ahora los códigos cíclicos generados por $P(x)$ son capaces de detectar errores simples y dobles si la longitud n del codeword es igual o menor que el exponente al que pertenece $P(x)$, es decir, si n ≤ e. Para comprender esto basta seguir la siguiente línea de razonamiento: Si $P(x)$ pertenece a e es porque x^e+1 es divisible entre $P(x)$, pero $x^{e-1}+1$ no resulta divisible entre $P(x)$ porque e es el menor entero en que resulta divisible entre $P(x)$. Pero si no es divisible x^(e-1) + x entonces cualquier patrón de errores con ese factor será detectado, y ese es el factor que queda de cualquier error doble que pueda tener la palabra de código, ya que un error doble se representaría con $x^i + x^j$ donde i>j y quedaría $x^i (x^{i-j} + 1)$ que en el caso en que alcanza el mayor exponente es cuando los errores se hayan cometido en el primer y último dígito en cuyo caso el patrón de error sería $x^{e-1} + 1$ que porque un polinomio de largo $n=e$ tiene como mayor exponente $n-1 = e - 1$.

Ejemplo 6.1.1 de polinomio cíclico perteneciente al exponente 32768:

$P(x) = x^{15} + x^{14} + 1$
Pertenece al exponente 32 768.

Puede por lo tanto detectar cualquier error doble en tramas de esa longitud y otros múltiples patrones de error.

Ejemplos 6.1.2 de P(x) usados:

CRC- 12 = $x^{12} + x^{11} + x^5 + x^2 + x + 1$

CRC- 16 = $x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$

CRC- 32 = $x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$

(Utilizado en IEEE 802)

6.17. Implementación de Codificadores y Decodificadores de Códigos Cíclicos por HW

6.17.1. Cálculo del Residuo en las Salidas de los Registros

Las conexiones g_i existen si el coeficiente correspondiente en P(x) es 1 y no existen si es cero. Con la entrada del último dígito de la secuencia F(x), como se muestra en la figura 87, se obtiene los dígitos de R(x) en las salidas de los registros, siendo el de mayor grado el que se encuentra en el último registro y el término independiente a la salida del primer registro.

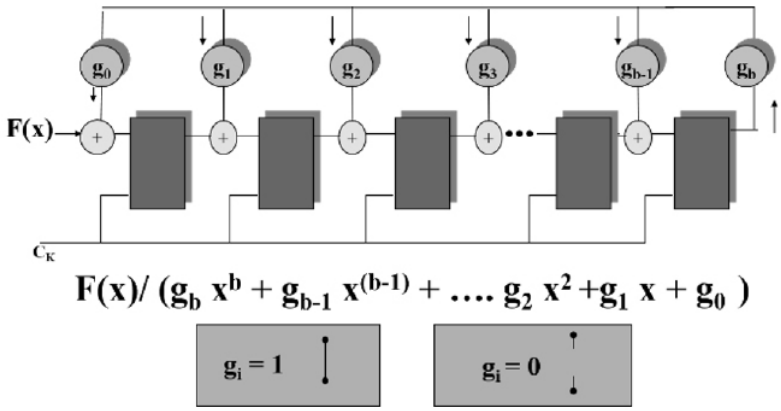


Fig. 88. Cálculo del residuo en las salidas de los registros

Residuo de F(x) /(x^3+x+1) a lo sumo de grado 2, (3 dígitos):

Ejemplo de la situación de los registros en el proceso de división expresada con la entrada del último 1 de la secuencia F(x) al dividir entre el F(x) /(x^3+x+1)Compruebe paso a paso que el resultado final es el indicado en la Figura 88. (Stremler, 2008)

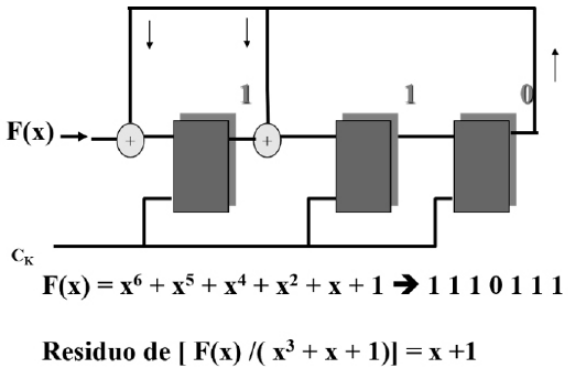


Fig. 89. Cálculo del residuo en las salidas de los registros

6.17.2 Códigos Cíclicos

El codificador debe ser capaz de, a partir de G(x), secuencia de información, calcular R(x) resultado de la división de G(x) x^b entre P(x).

A continuación de G(x) en el punto 1 (en rojo) se agrega la secuencia de R(x), que equivale a obtener la expresión G(x) x^b + R(x) que es la palabra codificada y transmitida que como es conocida es divisible entre P(x).

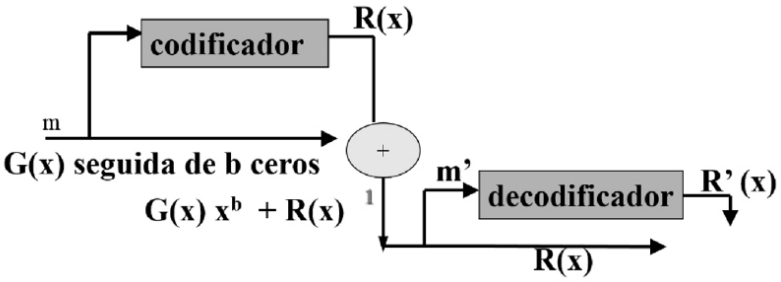


Fig. 90. A partir de G(x), secuencia de información, calcular R(x)

La secuencia de la palabra recibida en sus k primeros dígitos es utilizada para calcular el residuo del sec. Multiplicada por x^by se obtiene R´(x) y esta secuencia se compara con los últimos dígitos de la secuencia recibida correspondientes a R(x), si son iguales, se dice que no hay error, si son diferentes refleja la ocurrencia de error. Otro procedimiento equivalente es el de calcular en el receptor el residuo de la secuencia completa recibida entre P(x), si el residuo es cero, se dice que no hay error. (Romero, Contreras Muñoz, & Aguirre, 2016)

6.18. Circuitos codificadores

Este es el diagrama general de un codificador cíclico cuyo $P(x)=x^b + g_{(b-1)}\ x^{b-1} + ...g_{1x} + 1$. Para los primeros k pulsos de reloj los interruptores están en la posición 1 y en los b restantes pulsos de reloj en la posición 2. La secuencia codificada sale por el terminal del interruptor de la extrema derecha y queda completamente construido tras n pulsos de reloj. (Ramirez Viáfara et al., 2020)

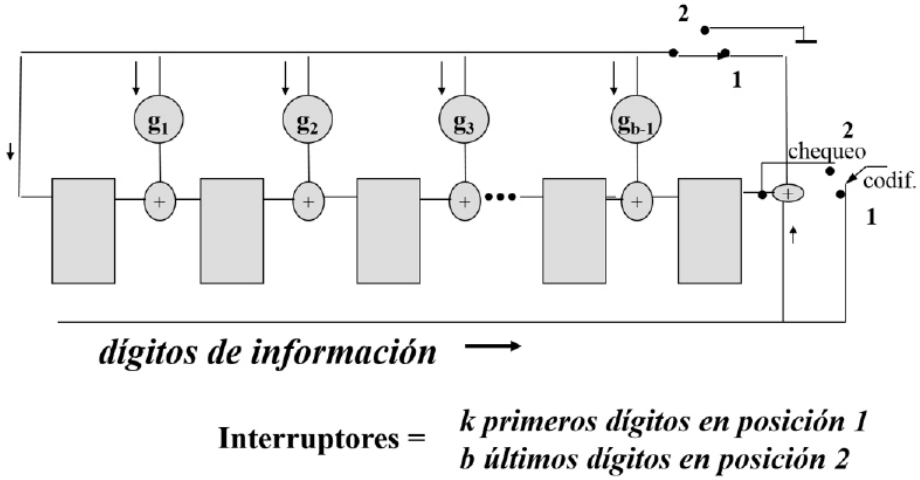


Fig. 91. Calculo R(x) resultado de la división de G(x) x^b entre P(x).

6.18.1. Circuito codificador

Para **P(x) = x³ + x + 1:**

Compruebe la operación siguiendo la secuencia de dígitos de información 1001.

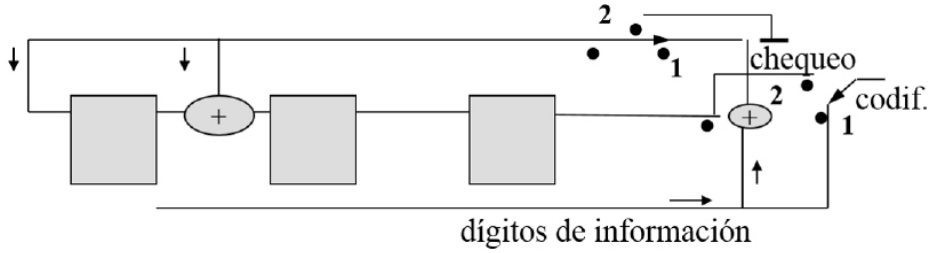


Fig. 92. Circuito codificador para P(x).

6.19. Conclusión Códigos Cíclicos

1. Se caracterizan por un P(x) de grado b.
2. Pueden detectar y/o corregir errores.
3. Muy utilizados por dos factores:
   - Su eficiencia en la detección de ráfagas de errores.
   - Su fácil implementación por HW con XOR y Registros de desplazamientos.

6.20. Otros Códigos: Código Golay (1)

Código binario (23,12) * con d_min=7 Por lo que es capaz de corregir errores triples y detectar hasta 6 errores en las palabras códigos.

$$^{*}(n,k) \quad n=k+b$$

6.20.1. Otros Códigos: Código Golay Extendido (2)

Código binario (24,12) con d_{min}=8 Por lo que es capaz de corregir errores triples y detectar hasta 7 errores en las palabras códigos.

6.21. Otros Códigos: Códigos BCH o Bose-Chadhuri-Hocquenghem (3)

Clase de códigos cíclicos capaces de corregir múltiples errores.
Están caracterizados por:

$$2b = n + 1$$

$$n - k = b$$

$$b >= 3$$

$$Distancia\ mínima = 2t + 1$$

Ejemplos de códigos BCH:

(15, 7) d_{mim}=5

(127, 64) Capaz de corregir 10 errores

(127, 36) Capaz de corregir 15 errores

6.22. Otros Códigos: Código Reed-Solomon (RS) (4)

- Es una subclase de códigos BCH no binarios. Opera con símbolos de “b” bits cada uno en lugar de bits individuales.
- Muy útil y empleado para la corrección de errores múltiples.

6.23. Canal Binario Simétrico

Hasta el momento se ha tratado la codificación de canal con códigos de bloques desde un punto de vista matemático, sin relacionarlo con el Bt, ni con potencias de transmisión. (Cook, 1967)

Considere el caso que se usa como canal un CBS (Canal Binario Simétrico) con probabilidad de error p y probabilidad de correcto (1- p).

En este análisis se considera que p no varía en el canal por el hecho de considerar el canal con y sin codificación.

Probabilidad de que la palabra no codificada tenga un error no detectado. (Cook, 1967)

$$P_{und} = P\ (1 \text{ error}) + P(2 \text{ errores}) + P(3 \text{ errores})$$

$$= (3)\, p\, (1-p)^2 + (3)\, p^2\, (1-p) + (3)\, p^3$$

$$= \text{(aprox)}\ \ (3)\, p\, (1-p)^2$$

E igual a 1 menos la probabilidad de que llegue todo correcto, es decir

$$P_{und} = 1 - P\ correcto = 1 - (1-p)^3$$

Con $p = 10^{-3}$

$$P_{und} = 2.9 \times 10^{-3}$$

Considere un código de bloque de un código de paridad con k=3 y n=4 con un bit de paridad par. Este código detecta errores simples y triples (Todos los errores impares). La probabilidad de error no detectado es la P (dos errores) +P (cuatro errores)

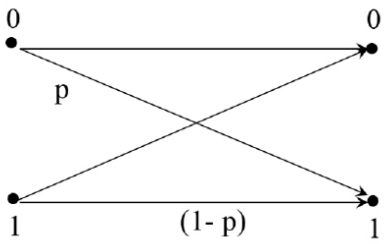


Fig. 93. La probabilidad de error no detectado.

$$P_{cnd} = (4)\, p^2\, (1-p)^2 + p^4$$

$$4!\ldots\ldots P^2\ (1\text{-}p)2 + p^4 = 6p^2 - 12\,p^3 + 7p^4$$

$$2!\ 2!$$

$$\text{Si } p = 10^{-3}\ ;\ P_{cnd} = 6\,x\,10^{-6}$$

$$P_{cnd} = 6\,x\,10^{-6}$$

Se trata el error no detectado, porque el código es detector de errores, si el código fuera de corrección de errores simples, la Pe sería la probabilidad de más de un error.

PB vs Eb/N0 PB = P error en el bloque:

P_b Es la probabilidad de error en una palabra de código teniendo en cuenta la corrección del código y es la probabilidad de error en una palabra sin codificar. E_b Es la energía de la señal mediante la cual se representa un bit. No es la Densidad espectral de potencia del Ruido, una magnitud que caracteriza la potencia del ruido que afecta la recepción de la señal, supuesto esté en condiciones extremas de adversidad puesto que se supone con Densidad Espectral de Potencia plana. El gráfico muestra el concepto de Ganancia de Codificación, que no es más que la disminución que puede experimentar la relación expresada en dB, de E_b (Energía de un bit) entre No, (la densidad espectral de potencia de ruido), para obtener igual Probabilidad de error no detectado P_b, en un canal con codificación que el obtenido en un canal sin codificación. (Abramson, 1986)

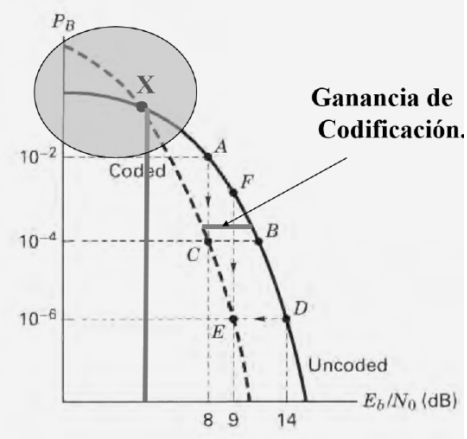


Fig. 94. La probabilidad de error no detectado.

Aprecien que la codificación permite para iguales relaciones de Eb/No obtener menores PB en los casos codificados que en los casos sin codificar. Codificación es solución adecuada cuando la Relación Eb/No es mayor que un límite, por debajo de la cual introducir redundancia en lugar de mejorar la PB la deteriora. En este gráfico de la figura 268, el punto X representa la condición límite.

Menor energía de bit para igual potencia, el Bt necesario para transmitirlos mayor y por tanto mayor ruido total. Hay una zona en que la curva de codificado tiene peor comportamiento que la no codificada ¿por qué? Aprecien que Introducir redundancia implica enviar mayor cantidad de bits en el mismo tiempo, por lo tanto, los bits serán más estrechos, lo que determina la necesidad de incrementar el Bt (Ancho de banda de Transmisión) y por lo tanto ingreso al receptor de mayor potencia de ruido y por lo tanto se puede incrementar la PB. (Abramson, 1986)

6.24. Ganancia de Codificación

Valor en dB en que puede disminuirse (E_b/No) en el sistema con codificación manteniendo igual P_b que en un sistema sin codificación.

Cuando se tienen tramas sin detección y corrección de errores, la ocurrencia de cualquier error implica que la trama tiene errores, sin embargo, cuando se introduce un código, ocurrirá que se pueden dar errores en la trama que pueden ser corregidos y en definitiva que no signifiquen error en la trama, pero para ello habrá que introducir bits de chequeo. (Sundberg, 1986)

La Ganancia de codificación es la disminución de la Energía de cada bit entre No, expresada en dB que se puede aplicar a una secuencia codificada para que tenga igual Pe_B que la que tenía la secuencia sin codificar. Es decir, codificar permitirá: Disminuir la relación Eb/No sin deteriorar la Pe_B o manteniendo la relación Eb/No disminuir la Pe_B. (Cook, 1967)

Conclusiones

- La codificación de canal juega un papel importantísimo en la Transmisión de Datos.
- El método empleado depende de las condiciones de la comunicación y de la aplicación en particular.
- Los códigos cíclicos son muy empleados por su fácil implementación y su especial eficiencia en la detección de ráfagas de errores.

CAPÍTULO 7

CÓDIGOS DE CONVOLUCIÓN

Convolution Codes

Resumen

Los códigos de convolución son técnicas de corrección de errores que se utilizan para mejorar la fiabilidad de las transmisiones de datos. Los codificadores convolucionales generan secuencias de bits de salida a partir de secuencias de bits de entrada mediante vectores de conexión o polinomios generadores. Estos códigos se representan mediante diagramas de estados, árboles de código y diagramas de rejilla. La distancia entre palabras es una medida de la capacidad del código para detectar y corregir errores. En el proceso de decodificación, se utiliza el algoritmo de Viterbi para encontrar la secuencia de bits más probable en base a la secuencia recibida. Este algoritmo funciona mediante la exploración de un árbol de código y puede lograr una decodificación secuencial eficiente. Las ganancias de codificación son valores que indican el rendimiento del código y se utilizan para evaluar su efectividad. Es importante tener en cuenta que algunos esquemas de códigos de convolución pueden sufrir de errores catastróficos, lo que significa que un único error en la entrada puede llevar a múltiples errores en la salida. Por ello, se emplean diferentes estructuras de códigos de convolución para abordar estas limitaciones y mejorar la capacidad de corrección de errores de estos códigos.

Abstract

Convolutional codes are error correction techniques used to enhance the reliability of data transmissions. Convolutional encoders generate output bit sequences from input bit sequences using connection vectors or

generator polynomials. These codes are represented through state diagrams, code trees, and trellis diagrams. The distance between words is a measure of the code's ability to detect and correct errors.

In the decoding process, the Viterbi algorithm is employed to find the most probable bit sequence based on the received sequence. This algorithm works by exploring a code tree and can achieve efficient sequential decoding. Coding gains are values indicating the code's performance and are used to evaluate its effectiveness.

It is important to note that some convolutional code schemes may suffer from catastrophic errors, meaning a single error in the input can lead to multiple errors in the output. Therefore, various convolutional code structures are employed to address these limitations and enhance the error-correcting capability of these codes.

7.1. Códigos de Convolución

Los códigos de convolución son un tipo de códigos correctores de errores que se utilizan en la detección y corrección de errores en sistemas de comunicación y almacenamiento de datos. Estos códigos son especialmente efectivos en entornos en los que la transmisión de datos puede ser propensa a errores, como en las comunicaciones inalámbricas o las transmisiones de datos digitales. La característica principal de los códigos de convolución es su estructura basada en una máquina de estados finitos, que se utiliza para codificar los datos de entrada en una secuencia de bits de salida. A medida que los datos se transmiten o almacenan, estos códigos generan una secuencia de bits codificada que contiene redundancia, lo que facilita la detección y corrección de errores. Los códigos de convolución son particularmente conocidos por su capacidad para detectar y corregir errores de manera eficiente. Los algoritmos utilizados para la codificación y la decodificación de estos códigos son altamente sofisticados y se basan

en operaciones de convolución en el dominio de la señal. Cuando se reciben datos codificados mediante códigos de convolución, se utiliza un decodificador que aplica técnicas de Viterbi u otros algoritmos para estimar cuáles eran los datos originales, incluso si se han producido errores durante la transmisión. Los códigos de convolución son códigos correctores de errores que utilizan una estructura de máquina de estados finitos para codificar datos de entrada en secuencias de bits de salida con redundancia. Estos códigos son ampliamente utilizados en aplicaciones de comunicación y almacenamiento para detectar y corregir errores de manera efectiva.

7.2. Técnicas Foward Error Correction (FEC)

Las técnicas FEC, incluidos los códigos de convolución, son fundamentales para mejorar la integridad de los datos en sistemas de comunicación y almacenamiento al agregar redundancia y permitir la detección y corrección de errores. Los códigos de convolución son una de las implementaciones específicas de FEC utilizadas en una variedad de aplicaciones donde la corrección de errores es crítica. Las técnicas FEC, o "Forward Error Correction" (Corrección de Errores hacia Adelante), se refieren a un conjunto de métodos utilizados en sistemas de comunicación y almacenamiento de datos para detectar y corregir errores en la información transmitida o almacenada. Los códigos de convolución son una de las técnicas FEC utilizadas en este contexto. Aquí hay algunas características y puntos clave sobre las técnicas FEC en relación con los códigos de convolución:

1. **Redundancia adicional:** Las técnicas FEC, incluidos los códigos de convolución, agregan información redundante a los datos originales antes de la transmisión o el almacenamiento. Esta redundancia permite que el receptor detecte y, en algunos casos, corrija errores en los datos recibidos sin necesidad de una solicitud de retransmisión.

2. **Implementación en tiempo real:** Los códigos de convolución son especialmente adecuados para aplicaciones en tiempo real, como comunicaciones inalámbricas y transmisiones de datos en vivo. La decodificación de estos códigos se puede realizar de manera eficiente a medida que se reciben los datos, lo que permite una corrección continua de errores en la transmisión.

3. **Paridad convolucional:** Los códigos de convolución utilizan esquemas de paridad convolucional, lo que significa que la información de paridad se calcula a partir de una combinación de bits anteriores en la secuencia de datos. Esto facilita la detección y corrección de errores, ya que se considera la historia de los bits anteriores para tomar decisiones de corrección.

4. **Eficiencia en la corrección:** Los códigos de convolución son especialmente eficientes en la corrección de errores, lo que significa que pueden recuperar datos confiablemente incluso cuando se han producido una cantidad significativa de errores en la transmisión. Esto los hace valiosos en situaciones en las que la calidad de la señal es variable o propensa a interferencias.

5. **Complejidad del decodificador:** Aunque los códigos de convolución son efectivos, los decodificadores de Viterbi u otros algoritmos utilizados para decodificarlos pueden ser computacionalmente intensivos. La complejidad del decodificador puede variar según la tasa de error y el nivel de corrección requerido.

La aplicación de códigos correctores de errores es común en diversos contextos, y uno de los códigos más prevalentes en esta técnica es el código de convolución. Es importante destacar que la técnica FEC no se limita únicamente a la detección de errores, sino que también implica llevar a cabo múltiples iteraciones para precisar la ubicación de los errores. Estos códigos encuentran aplicaciones en una serie de situaciones, incluyendo:

- Usos militares.
- La protección de fragmentos de información de menor tamaño, como en la verificación de la integridad de cabeceras en sistemas de conmutación digital.
- También son fundamentales en sistemas de transmisión que involucran un transmisor y varios receptores.
- Además, son relevantes en la comunicación por satélite, especialmente cuando se trata de transmisiones con largos tiempos de propagación.

7.3. Códigos de Convolución

Código de corrección de errores: A diferencia de los códigos de bloque, este tipo de código no se basa en un proceso de codificación discreto, sino que su codificación es constante y continua. Se utiliza en la transmisión de datos por satélite, donde se emplea una combinación de Trellis Cod Modulation (TCM) junto con tecnología de modulación (una tecnología que requiere adquirir destrezas específicas). La mejor manera de comprender el proceso de codificación implica familiarizarse con la operación del codificador. (Tomasi, 2003)

Un codificador básico se compone de elementos sencillos, que incluyen un registro de desplazamiento y un módulo de escalera (basado en la operación OR exclusiva) definidos por los parámetros n, k y K. En el contexto de un diagrama de conexiones, la relación k/n se utiliza para expresar la velocidad de codificación, donde:

k representa la cantidad de bits introducidos en el registro para determinar los grupos de salida.

n es el número de bits de entrada por cada k grupos.

K es el número total de grupos de bits de entrada.

7.4. Codificador convolucional

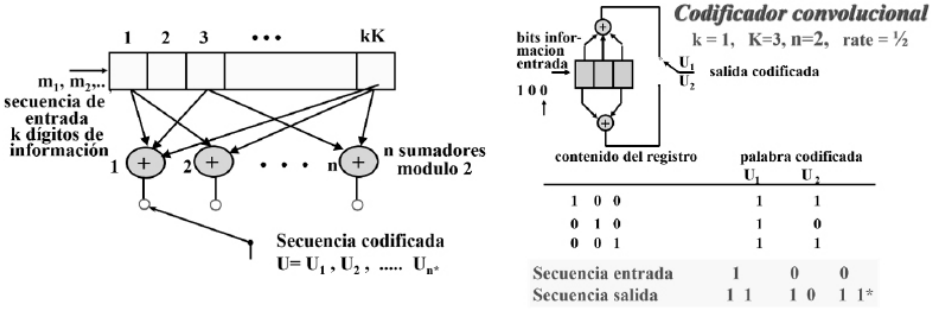


Fig. 95. Codificador convolucional. a) y b)

7.4.1. Codificador convolucional, Vectores de Conexión:

Los códigos convolucionales se representan mediante vectores concatenados. (Tomasi, 2003)

Ejemplo: Esto se aprecia en la figura 95.

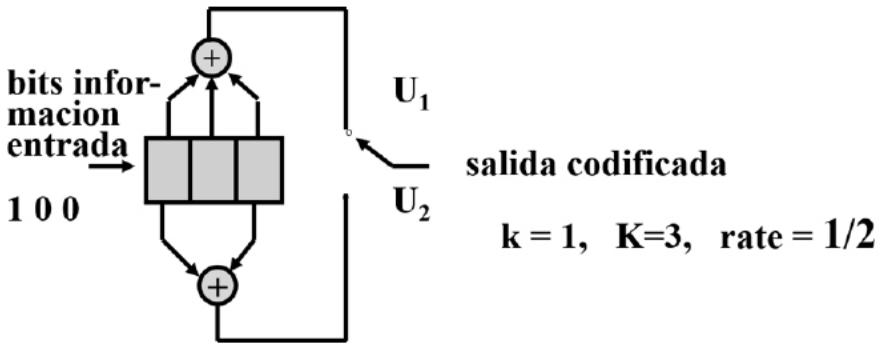


Fig. 96. Codificador convolucional, vectores de conexión.

g1 = 1 1 1 1 1 = 7_8 (el registro 1 participa en las posiciones 2 y 3 para obtener U1)

g2 = 1 0 1 = 5_8 (obtiene U2, participan en las posiciones del registro 1 y 3)

7.4.2. Codificador convolucional, vectores de conexión

Estos son equivalentes a Polinomios generadores, las celdas se numeran de 0 a kK-1. Se dispone de un polinomio para cada sumador o salida. Término independiente = La información de entrada va a la posición de bit o posición 0 de adición.

Estos son los Polinomios generadores de este codificador

$$\mathbf{P1 = 1 + D + D^2 \mid P_2 = 1 + D^2}$$

Dn = Celda n va al sumador.

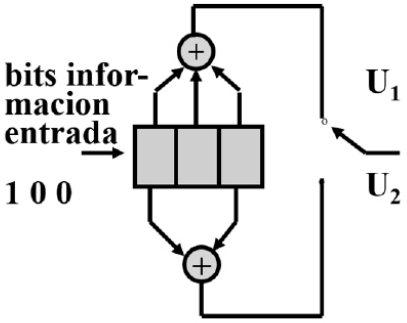


Fig. 97. Codificador convolucional, vectores de conexión equivalentes.

7.4.3. Codificador Convolucional:

La salida se encuentra estrechamente relacionada con la cantidad de datos que se ingresan y se mantienen en el registro. El valor almacenado en el registro desempeña el papel de una memoria para el interruptor, definiendo su estado. El resultado final se determina por tanto por el número introducido y por el estado actual del interruptor. Cuando K se establece en 3, se generan cuatro combinaciones únicas, lo que equivale a la multiplicación de dos números primos por cuatro condiciones diferentes. (Feher, 2004)

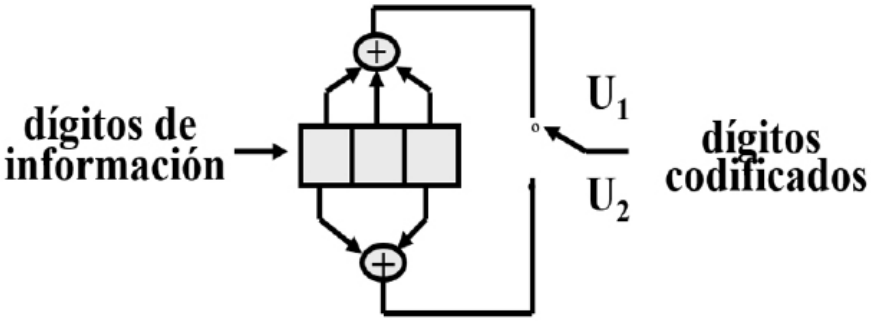


Fig. 98. Codificador convolucional, vectores de conexión equivalentes.

7.5. Diagrama de Estados

El concepto de diagrama de estados se refiere a una representación que abarca la totalidad de los detalles acerca del proceso de cifrado. En un codificador, se pueden aplicar diversas combinaciones a los bits almacenados en la memoria en múltiples niveles de codificación. En este contexto, cada bit de información de entrada a partir de un estado específico determina tanto el bit de salida resultante como el estado al que se dirige. (Sundberg, 1986)

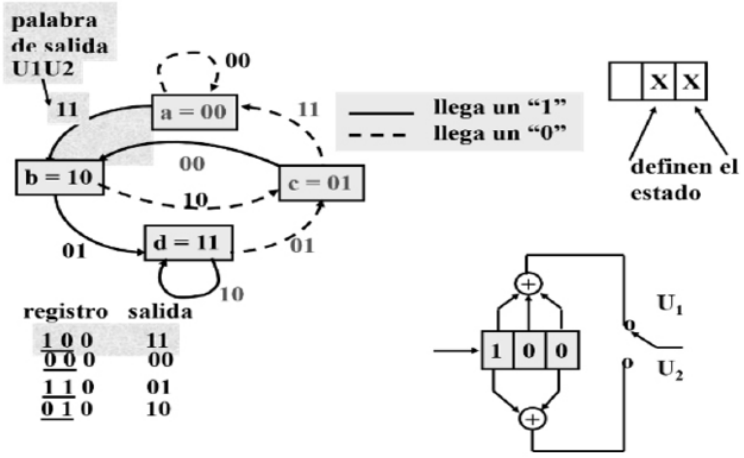


Fig. 99. Diagrama de Estados

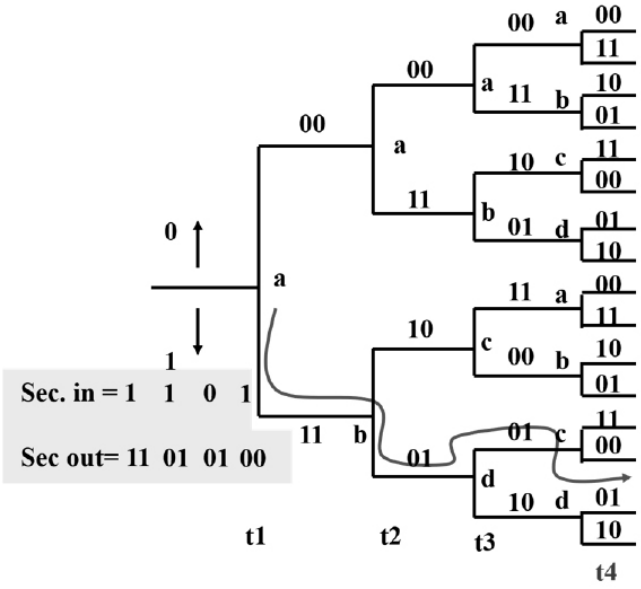


Fig. 100. Árbol de códigos.

7.6. Árbol de Código

Una manera de definir y detallar todas las potenciales producciones de un codificador consiste en utilizar un diagrama de estados. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la complejidad de este diagrama aumenta de manera significativa a medida que se incrementa el número de bits de información que se están considerando. En otras palabras, a medida que más bits de información entran en juego, la cantidad de estados posibles y las conexiones entre ellos aumentan de manera exponencial, lo que puede hacer que el diagrama de estados sea más complicado y extenso. (Buehler & Lunden, 1966)

Un árbol de código es una representación gráfica que esquematiza todas las posibles combinaciones resultantes de un proceso de conmutación. En este árbol, los diferentes estados se muestran como nodos o puntos interconectados. Conforme se incrementa el flujo de datos, las ramas que representan las combinaciones posibles en el árbol

también crecen y se expanden. En esencia, a medida que se maneja una mayor cantidad de información, el árbol de código se vuelve más densamente poblado con nodos y conexiones, reflejando la complejidad creciente de las posibles secuencias de datos. (Buehler & Lunden, 1966)

7.7. Diagrama de Rejilla

En este tipo de representación, se crea un esquema que identifica tanto el instante de tiempo específico del codificador como el estado particular en ese momento. Cada uno de estos puntos del esquema representa un estado posible, y para cada instante de tiempo, se muestran todos los estados posibles del codificador. Estos estados se conectan entre sí mediante líneas que ilustran las transiciones de un estado a otro. La decisión de transición se basa en el bit de información que llega en ese momento particular.

Lo que hace que este enfoque sea interesante es su capacidad para proporcionar una representación más concisa y estructurada en comparación con el árbol de código. A medida que se avanza en el tiempo, las ramas de estados y las conexiones se repiten, lo que permite una visión más organizada del proceso de codificación en curso. (Buehler & Lunden, 1966)

Además, en este diagrama de rejilla, cada conexión entre estados se etiqueta con la salida del codificador en esa transición específica. Esto facilita una comprensión más clara de cómo los datos se codifican a medida que avanzan a través de los distintos estados del codificador en cada instante del tiempo, lo que resulta especialmente útil para analizar el flujo de datos y el comportamiento del codificador en detalle. En resumen, el diagrama de rejilla es una representación efectiva y organizada que destaca las transiciones y salidas del codificador a lo largo del tiempo. Esto se aprecia en la Figura 100.

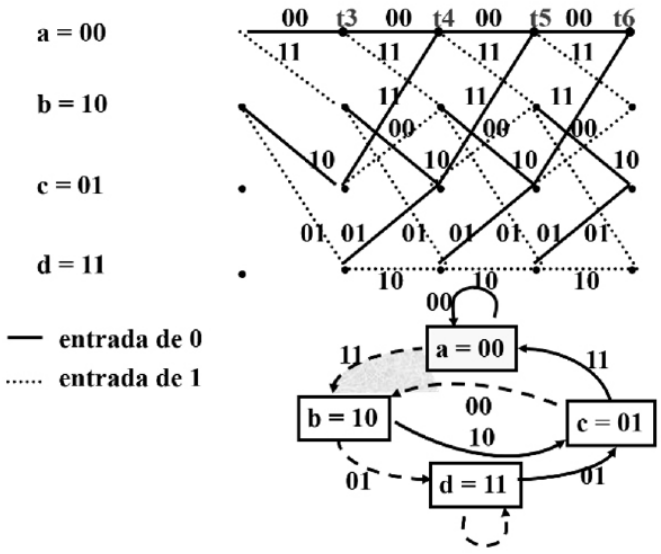


Fig. 101. Diagrama de Rejilla.

En este enfoque, se crea un esquema que incluye la representación de todos los estados del codificador en cada punto específico del tiempo, y estos estados se conectan entre sí mediante líneas que indican cómo ocurre la transición de un estado a otro, dependiendo de la información de entrada en ese momento particular.

Esta representación es más eficiente en cuanto a la utilización del espacio en comparación con un árbol de códigos, ya que los estados se presentan de manera más concisa y organizada. Además, es un enfoque recursivo, lo que significa que se repite de manera sistemática a lo largo del tiempo para proporcionar una visión detallada y completa de las operaciones del codificador a medida que los datos avanzan.

Cada conexión o enlace en este diagrama de red se asocia con la salida de un codificador de transporte específico en esa transición particular. Esta característica hace que sea más claro y accesible entender cómo los datos son codificados a medida que se desplazan entre los distintos estados del codificador en diferentes momentos. Este en-

foque es especialmente valioso para un análisis minucioso del comportamiento del codificador y el seguimiento de las transiciones y salidas a lo largo del tiempo en un proceso de codificación de datos. En resumen, el diagrama de red proporciona una visión organizada y detallada de las operaciones del codificador a lo largo del tiempo, lo que facilita el estudio de su funcionamiento y las salidas resultantes. (Stremler, 2008)

7.8. Distancia entre palabras

Para comprender el proceso de decodificación, es fundamental tener en cuenta el concepto de distancia entre dos secuencias. La distancia entre dos secuencias se refiere a una medida que evalúa la diferencia o similitud entre ellas. Esta medida es esencial en diversos campos, como la teoría de la información y la corrección de errores.

En el contexto de la decodificación, la distancia entre dos secuencias se utiliza para determinar cuán diferente es una secuencia recibida de la secuencia original o esperada. Cuanto menor sea la distancia, mayor será la similitud entre las dos secuencias y, por lo tanto, menor será la probabilidad de que se haya producido un error en la transmisión o almacenamiento de los datos. Por otro lado, una distancia mayor indica una mayor discrepancia y sugiere una mayor probabilidad de error.

El uso de la distancia entre secuencias es crucial para los algoritmos de decodificación en sistemas de corrección de errores. Estos algoritmos utilizan esta métrica para identificar y corregir los errores que pueden haber ocurrido durante la transmisión o almacenamiento de datos. Cuanto mejor se comprenda y se aplique la noción de distancia entre secuencias, mayor será la eficacia de la decodificación y la capacidad de recuperar con precisión los datos originales a pesar de la presencia de errores. (Tanenbaum, 2003)

En consideración a esto, el concepto de distancia entre dos secuencias desempeña un papel fundamental en el proceso de decodificación al evaluar la similitud o diferencia entre una secuencia recibida y la secuencia original. Esto es esencial para la detección y corrección de errores en sistemas de comunicación y almacenamiento de datos.

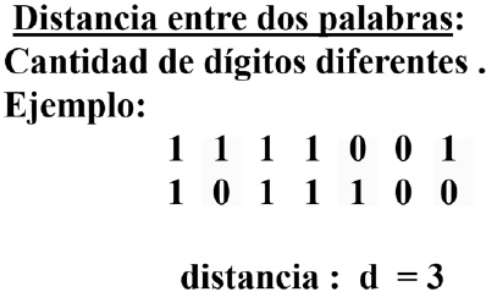


Fig. 102. Distancia entre palabras.

7.9. Proceso de Decodificación

En el proceso de codificación, uno de los pasos fundamentales es la elección del formato adecuado para los datos que se van a transmitir o almacenar. Esta elección se basa en la minimización de la distancia en relación con una configuración de referencia o patrón predefinido. Esta configuración de referencia es esencial para determinar cuándo se han producido errores en la transmisión y cómo corregirlos.

El objetivo principal de este enfoque es detectar y corregir los errores de transmisión. Una estrategia para lograrlo sería examinar todas las posibles salidas generadas por el codificador, lo que implica evaluar cada secuencia resultante del proceso de codificación. Sin embargo, es importante destacar que esta opción podría ser extremadamente costosa desde el punto de vista computacional, especialmente cuando hay un gran número de salidas posibles.

El número de secuencias posibles, es decir, las diferentes salidas generadas por el proceso de codificación, aumenta de manera exponencial a medida que la longitud de la secuencia de puntos de datos se incrementa. Este crecimiento exponencial se debe a la combinación de los datos en múltiples puntos y estados del codificador, lo que hace que el análisis exhaustivo de todas las salidas sea un desafío computacional significativo. (Stallings, 2004)

En determinación a lo tratado, en el proceso de codificación, se selecciona un formato de datos que minimice la distancia con respecto a una configuración de referencia, lo que permite detectar y corregir errores de transmisión. Sin embargo, la evaluación de todas las posibles salidas del codificador puede ser costosa computacionalmente debido al rápido aumento en el número de secuencias posibles, en particular cuando la longitud de la secuencia de datos es significativa. (Tropena, 2006)

7.9.1. Árbol de Código:

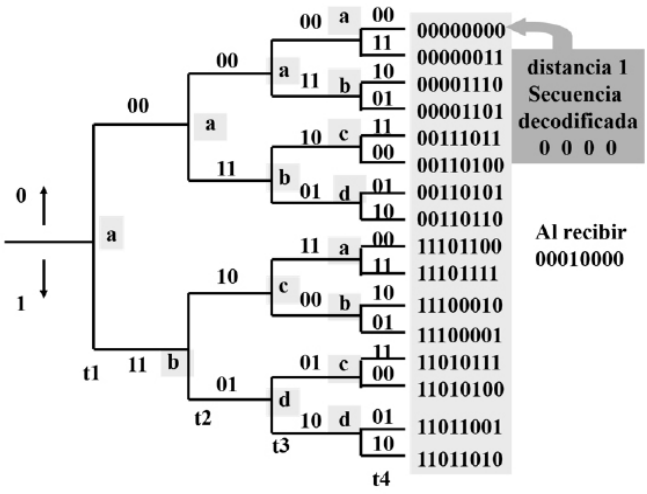


Fig. 103. Árbol de Código - Distancia entre palabras.

7.9.2. Decodificación Secuencial

Esto es un método que se utiliza para decodificar datos codificados siguiendo un árbol de decisiones, teniendo en cuenta los bits codificados que se han recibido. En este enfoque, se sigue un proceso secuencial de toma de decisiones a medida que se descifran los datos.

La idea clave en la decodificación secuencial es que la discrepancia o diferencia entre el objeto recibido y la salida del árbol de decisión aumenta en caso de que se produzca un error en el proceso de descodificación. En otras palabras, se compara constantemente la secuencia de datos descodificada con la secuencia original esperada, y si se detecta una desviación significativa, se reconoce que ha ocurrido un error de descodificación. (Alvin, 1965)

Este enfoque de decodificación secuencial fue uno de los primeros métodos utilizados en la corrección de errores, pero presenta algunas limitaciones importantes. En particular, requiere un esfuerzo computacional considerable cuando se trabajan con secuencias de datos muy largas o en presencia de errores de transmisión. Además, no garantiza una descodificación 100% precisa, lo que significa que pueden ocurrir errores en el proceso de recuperación de datos.

La decodificación secuencial implica una descodificación basada en un árbol de decisiones y la comparación constante entre la secuencia descodificada y la secuencia original para detectar errores. Si bien fue uno de los primeros métodos utilizados, puede ser computacionalmente costoso y no garantiza una corrección perfecta de errores en todas las situaciones.

7.10. Algoritmo de Viterbi

El método óptimo para seleccionar la salida más probable es apropiado en códigos con un valor pequeño de K, ya que el cálculo crece de manera exponencial a medida que K aumenta.

Este enunciado se refiere al Algoritmo de Viterbi, que es una técnica utilizada en la decodificación de códigos de corrección de errores. En el contexto del algoritmo de Viterbi, el objetivo es identificar la secuencia de datos más probable o la más cercana a la original, dado un conjunto de datos codificados y la presencia de errores de transmisión.

Cuando se menciona que este método es adecuado para códigos con un valor pequeño de K, se está haciendo referencia a la longitud de las secuencias de datos que se están decodificando. En otras palabras, el algoritmo de Viterbi funciona de manera óptima cuando se aplica a secuencias de datos relativamente cortas. (Armstrong, 1984)

Sin embargo, se destaca que el cálculo requerido por el algoritmo de Viterbi aumenta de manera exponencial a medida que K, es decir, la longitud de las secuencias de datos aumenta. Esto significa que a medida que se manejan secuencias de datos más largas, el esfuerzo computacional necesario para la decodificación se vuelve significativamente mayor.

Este enunciado que se refiere al Algoritmo de Viterbi, especifica que este es eficiente para códigos con secuencias de datos cortas, pero puede volverse computacionalmente costoso a medida que las secuencias se hacen más largas. El objetivo del algoritmo es seleccionar la secuencia de datos más probable dada la codificación y la presencia de errores de transmisión. (Menso, 2020)

7.10.1. Fundamentos Algoritmo de Viterbi

El principio subyacente del Algoritmo de Viterbi radica en encontrar la descodificación óptima, que se traduce en la salida del árbol de decisiones que presenta la menor discrepancia en comparación con la secuencia recibida. Este enfoque implica examinar minuciosamente todas las salidas posibles generadas por el árbol de decisiones y compararlas con las secuencias obtenidas, lo que requiere una gran capa-

cidad de cómputo debido al crecimiento exponencial del número de árboles generados con el incremento del número de puntos de datos.

Este aumento exponencial se debe al carácter iterativo de los árboles de decisión utilizados en el Algoritmo de Viterbi. A medida que se avanza en el proceso, el estado de simulación se establece tras varios pasos. Esto significa que se deben considerar numerosas combinaciones de estados y decisiones a lo largo de un conjunto de datos, lo que, en última instancia, exige una importante capacidad de procesamiento computacional.

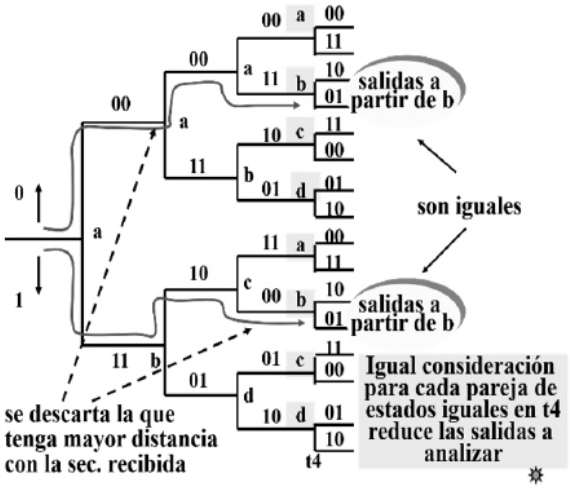


Fig. 104. Árbol tiene carácter repetitivo y tras algunos pasos aparecen los estados duplicados

El fundamento del Algoritmo de Viterbi se basa en encontrar la salida óptima del árbol de decisiones que minimiza la discrepancia con la secuencia recibida. A pesar de su eficacia, este enfoque conlleva un gran esfuerzo computacional debido al crecimiento exponencial en el número de árboles generados, dado el carácter iterativo del proceso y la necesidad de analizar múltiples combinaciones de estados y decisiones a lo largo del conjunto de datos. (Sundberg, 1986)

El fundamento del Algoritmo de Viterbi se basa en una idea fundamental, como se aprecia en la Figura 104, cuando se tienen dos rutas de decisión diferentes que convergen en un estado común, como el estado "b" que se muestra en la figura, es necesario considerar ambas posibilidades. En el caso de la figura, ambas rutas llegan al mismo estado en el tiempo "t4". Sin embargo, no todas las rutas son igualmente válidas. Se evalúan las distancias entre las secuencias obtenidas y las secuencias potenciales de cada ruta.

La clave aquí es que la ruta que tiene la mayor discrepancia o distancia con respecto a la secuencia recibida puede ser descartada como una candidata adecuada. Este proceso se aplica a cada estado en el diagrama de red, y solo se retiene como mejor candidato el estado que presenta la menor distancia con respecto a la secuencia recibida. En otras palabras, se busca la ruta que mejor se ajusta a los datos recibidos y se toma como la ruta más probable.

Cada candidato de ruta define un orden específico de información. Por ejemplo, en la rama superior que conduce al estado "b," se puede inferir que la secuencia de información es "001." No se descifra el dígito hasta que se reciba un dígito codificado que conserve el efecto de encriptación de esa información. (Stremler, 2008)

El proceso continúa a lo largo del diagrama de red hasta el punto en el que hay dos posibles entradas para cada modo. En este punto, se selecciona la entrada que tiene la distancia más corta en comparación con la información recibida y se declara como la "ruta superviviente," descartando la ruta con la distancia más larga. (Simon, 2022)

El Algoritmo de Viterbi se basa en evaluar múltiples rutas de decisión y seleccionar la que mejor se ajusta a los datos recibidos, considerando la distancia entre las secuencias obtenidas y las secuencias potenciales. Este proceso se aplica de manera iterativa a lo largo del diagrama de red, y se busca mantener la ruta más probable en función de la información recibida en cada etapa.

7.10.2. Ejemplo Decodificación de Viterbi

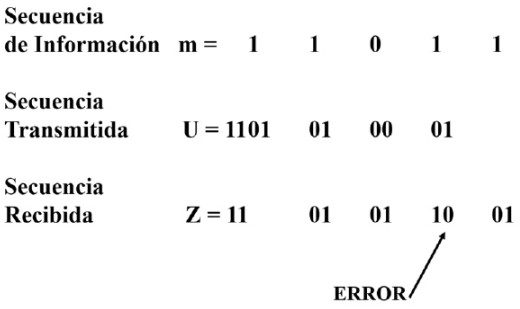


Fig. 105. Ejemplo Decodificación de Viterbi

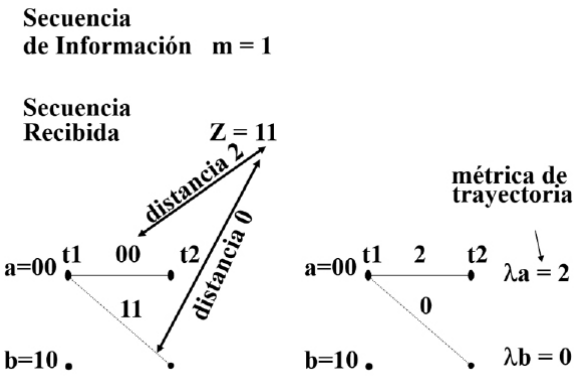


Fig. 106. Ejemplo Decodificación de Viterbi con entrada Z

La decodificación de Viterbi se basa en un concepto esencial que proviene de un diagrama de red. Este diagrama de red es una representación que se construye considerando la distancia entre la salida del codificador y la secuencia recibida en un momento determinado, en lugar de basarse únicamente en la salida del codificador en sí.

Para ilustrar este proceso, considere el ejemplo representado en la Figura 105 se recibe 11, donde la rama que se extiende desde el estado "a" está etiquetada como "2". Esta etiqueta se refiere a la distancia de paridad de transmisión igual a 2 desde el circuito 11, que es lo que se ha recibido en la salida del codificador (00). El proceso continúa, y la

transmisión desde la salida del codificador "a" hasta "b" se ajusta a la secuencia recibida en ese momento. Este proceso se repite para formar un gráfico enrejado que representa el proceso de decodificación. (Feher, 2004)

Es importante notar que la presencia de ramas con espacio cero en este gráfico de enrejado no implica que no se realicen operaciones de decodificación. Cada rama y bit codificado que contienen información deben ser considerados en el proceso de decodificación. Además, es necesario señalar que, en el contexto de Viterbi, la información codificada se trunca, lo que significa que no todos los bits pueden ser recuperados o decodificados, y este hecho debe ser considerado en el análisis.

La decodificación de Viterbi se apoya en un diagrama de red que se construye en función de la distancia entre la salida del codificador y la secuencia recibida en un instante específico. Este enfoque permite formar un gráfico de enrejado que representa el proceso de decodificación. Cada rama y bit codificado que contienen información deben ser considerados, y la truncación de la información también es un aspecto importante de este proceso. (Umelo et al. , 2022)

La decodificación de Viterbi es un proceso continuo en el que se calculan y acumulan las distancias a lo largo de cada trayectoria en el diagrama de enrejado. Estas distancias acumuladas se representan en la figura a través del término "Lambda".

En este contexto, el diagrama de enrejado es una representación visual que muestra las diversas rutas o trayectorias posibles que se pueden seguir para decodificar una secuencia de datos. Cada trayectoria tiene asociada una distancia acumulada que se calcula a medida que se avanza a través del diagrama. Estas distancias acumuladas reflejan la diferencia entre la secuencia de datos que se está considerando en una trayectoria particular y la secuencia recibida. (Feher, 2004)

El objetivo de acumular estas distancias es determinar cuál de las trayectorias es la más probable o adecuada como solución de decodificación. Al comparar las distancias acumuladas a lo largo de las diferentes trayectorias, se identifica la trayectoria que presenta la menor distancia, lo que sugiere que es la secuencia más probable.

Este proceso de acumulación de distancias y selección de la trayectoria más adecuada se repite a lo largo del diagrama de enrejado hasta llegar a un punto de decisión en el que se elige la trayectoria óptima como resultado de la decodificación, representada en la figura por las λ, mostrado en la Figura 106. En resumen, la decodificación de Viterbi implica calcular y acumular distancias a lo largo de diversas trayectorias en un diagrama de enrejado para identificar la secuencia más probable entre las opciones disponibles. (Romero et al., 2016)

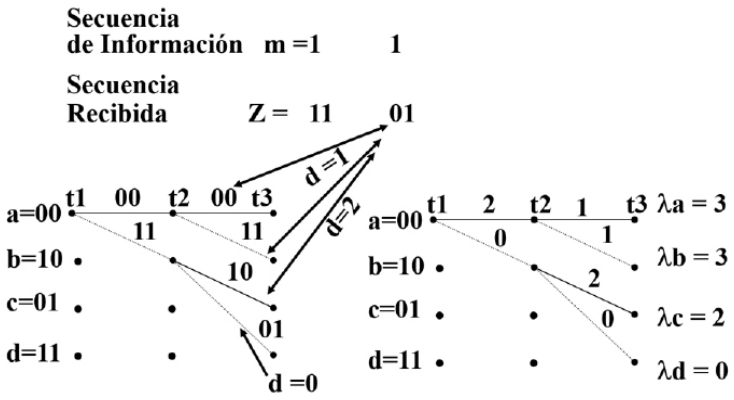


Fig. 107. Ejemplo Decodificación de Viterbi con entrada Z trayectoria en el diagrama de rejilla

Hacia el instante t4 en el proceso de decodificación de Viterbi, se comienza a notar que en cada estado del diagrama de enrejado convergen dos trayectorias candidatas. La elección de cuál de estas dos trayectorias se retiene como la ruta óptima se basa en las distancias acumuladas a lo largo de cada una de ellas.

En este punto, se compara la distancia acumulada de ambas trayectorias y se descarta la que presenta una distancia acumulada mayor. Aquí, las trayectorias que sobreviven son aquellas que tienen distancias acumuladas menores, lo que sugiere que son las secuencias de datos más probables y adecuadas en ese contexto.

Este proceso de selección de trayectorias se repite en cada estado a medida que se avanza a lo largo del diagrama de enrejado, y en cada etapa, se retiene la trayectoria con la distancia acumulada más baja. Esto asegura que se siga la ruta más probable a lo largo de la secuencia de datos, lo que a su vez conduce a la decodificación óptima. (Sundberg, 1986)

Durante la decodificación de Viterbi, a partir del instante t4, se identifican dos trayectorias candidatas en cada estado, y se elige la que tiene la menor distancia acumulada como la ruta superviviente. Este proceso se repite en cada estado a medida que se avanza en el diagrama de enrejado, lo que permite determinar la secuencia de datos más probable en función de las distancias acumuladas. (Varga, 2022)

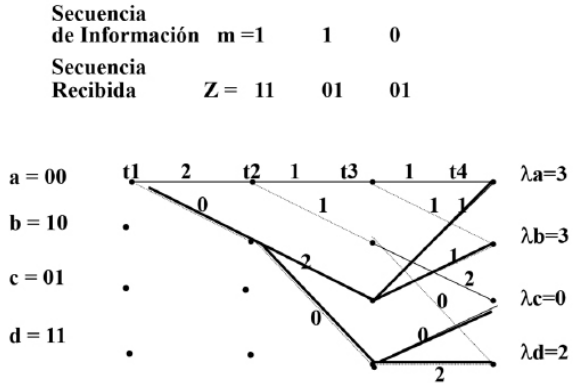


Fig. 108. Ejemplo Decodificación de Viterbi con entrada Z trayectoria en el diagrama de rejilla

Por ejemplo, cuando se llega al estado "b", se encuentra con dos trayectorias candidatas: una tiene un valor de "lambda" igual a 4, y la otra tiene un valor de λ igual a 3. En este punto, se toma la decisión de descartar la trayectoria con λ igual a 4 y retener la que tiene un valor de λ igual a 3, la cual se destaca en la Figura 108. (Cook, 1967)

Lo que es interesante notar es que, en este momento, es dar cuenta de que TODAS las trayectorias supervivientes, una de las cuales debe ser la óptima, comparten una rama común que va desde t1 a t2, pasando del estado "a" al estado "b." Esto significa que la trayectoria óptima debe necesariamente incluir esta rama como parte de su formación.

Es importante destacar que solo en este punto, después de identificar esta rama común, es posible llevar a cabo la decodificación del primer dígito de información, que en este caso se interpreta como "1". (Medina Delgado et al., 2017)

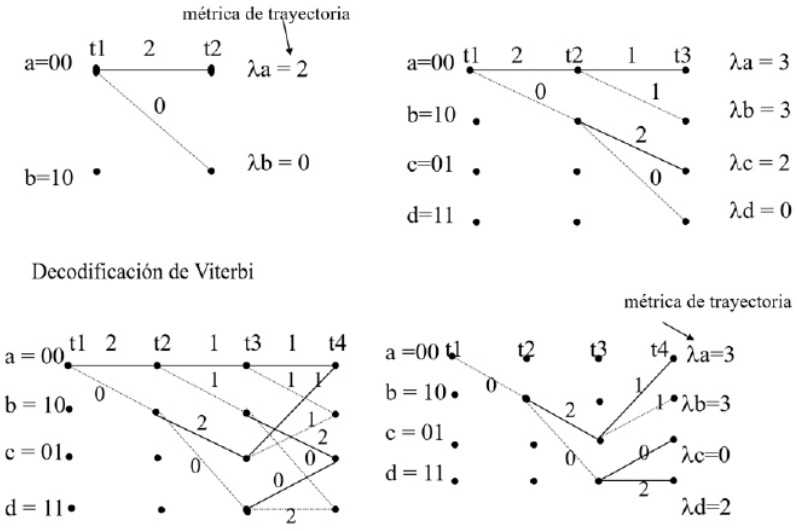


Fig. 109. Ejemplo Decodificación de Viterbi con entrada Z trayectoria en el diagrama de rejilla

En resumen, durante el proceso de decodificación de Viterbi, cuando se llega a un estado específico, se comparan las distancias de las trayectorias candidatas y se selecciona la más probable. Sin embargo, es solo más adelante, al identificar una rama común en todas las trayectorias supervivientes, que se puede decodificar con certeza un dígito de información, como en este ejemplo, donde se interpreta como "1." Este enfoque asegura que la decodificación sea precisa y se base en las trayectorias más probables. Todo esto se aprecia en la Figura 109.

7.11. Algoritmo de Viterbi

El algoritmo de Viterbi sigue su curso definiendo los caminos restantes en cada paso del proceso de decodificación. La clave para la decodificación eficiente es cuando, en un determinado punto del proceso, todos los caminos restantes comparten la misma rama en el diagrama de enrejado.

El Algoritmo de Viterbi se presenta como una técnica eficiente para decodificar códigos convolucionales. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el esfuerzo computacional requerido aumenta exponencialmente a medida que la longitud de la secuencia, representada por K, crece. Por lo tanto, es más adecuado para códigos con un valor pequeño de K.

El principio clave en el Algoritmo de Viterbi se basa en la identificación del camino del grafo residual que presenta la menor distancia en comparación con la secuencia obtenida. Este camino se considera el más probable y se elige la solución de decodificación. (Tomasi, 2003)

El Algoritmo de Viterbi es una técnica eficiente para decodificar códigos convolucionales. Su eficacia es especialmente evidente cuando se utilizan códigos con valores pequeños de K. Se basa en identificar el camino con la menor distancia en el grafo residual, lo que lleva a la decodificación óptima. Sin embargo, los detalles específicos del algoritmo pueden ser complicados, y el proceso se simplifica cuando to-

dos los caminos restantes comparten la misma rama en el diagrama de enrejado.

7.11.1. Ganancia de Codificación

La eficacia de un sistema de codificación se evalúa a través del concepto de ganancia de codificación. La ganancia de codificación se refiere a la ventaja que se obtiene al utilizar una técnica de codificación convolucional junto con el algoritmo de Viterbi. Esta ventaja se manifiesta en la capacidad de lograr un rendimiento similar al de un sistema de detección de señal, incluso cuando la relación señal-ruido (S/N) es menor.

En otras palabras, al emplear la codificación convolucional en conjunto con el algoritmo de Viterbi, se puede mejorar significativamente la calidad de la señal y la capacidad de detección, lo que permite que el sistema funcione de manera efectiva incluso en condiciones de menor relación señal-ruido. Esto es crucial en situaciones en las que la señal puede ser débil o ruidosa.

Además, cuando se utilizan códigos de ajuste (ajuste fino), es posible lograr una probabilidad de error (P) similar a la que se obtendría en un sistema equivalente que no emplea estos códigos. Esto significa que se puede mejorar la calidad de la comunicación y reducir la probabilidad de errores en la transmisión sin la necesidad de aumentar significativamente la potencia de la señal o la relación señal-ruido.

La ganancia de codificación se refiere a la mejora en la calidad y eficacia de un sistema de comunicación al utilizar técnicas de codificación como la codificación convolucional y el algoritmo de Viterbi. Esto permite que el sistema funcione de manera confiable incluso en condiciones de menor relación señal-ruido y mejora la probabilidad de error en la transmisión de datos, lo que es esencial en aplicaciones de comunicación. (Tomasi, 2003; Carlson, 2007)

$$P_e = f\left(\frac{E_b}{N_o}\right)$$

E_b = **Energía para la representación de un bit.**

N_o = **Potencia de ruido a la salida.**

$\left(\frac{E_b}{N_o}\right)$ es proporcional a la relación señal a ruido en la señal (S/N) recibida.

7.11.2. Ganancias de codificación, valores típicos

razón de codificación, r = 1/2		razón de codificación, r = 1/3	
K	GC dB	K	GC dB
3	3.97	3	4.25
4	4.76	4	5.23
5	5.43	5	6.02

Fig. 110. Ganancias de Codificación y valores típicos

Por satélite, por ejemplo. Al reducir la energía emitida y la potencia radiada por los satélites, los hace más livianos y económico.

7.12. Esquemas con Errores catastróficos

A pesar de que la información de entrada sea precisa y correcta, cualquier error en el proceso de descodificación puede dar lugar a la aparición de múltiples errores en la salida. Esto significa que, incluso si los datos de entrada son exactos, cualquier fallo en el proceso de descifrado puede tener un impacto significativo en la calidad de la salida. (Ramirez Viáfara, Romo Romero, & Silva Zambrano, 2020)

En un codificador donde la entrada permanece en el estado cero, la salida correspondiente será también cero. En otras palabras, cuando la entrada se encuentra en un estado particular (en este caso, el estado cero), la salida reflejará ese estado sin cambios.

En cuanto a los polinomios generadores, si tienen coeficientes comunes, significa que comparten términos o componentes en su defi-

nición. Esto puede influir en la relación entre los datos de entrada y salida en el proceso de codificación y decodificación. (Haykin, 2005)

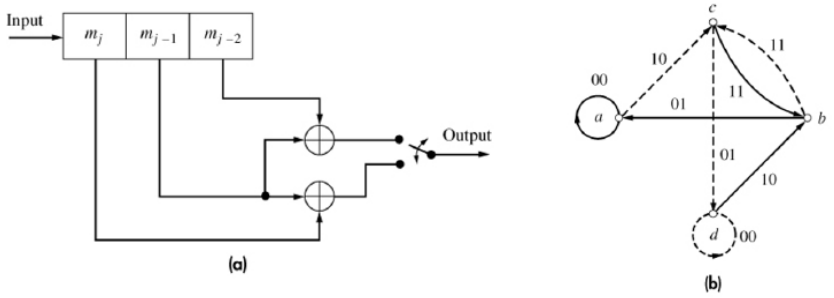


Fig. 111. Codificador sujeto a propagación de errores catastróficos (a) codificador (b) diagrama de estados

Incluso con información de entrada precisa, los errores en la descodificación pueden causar múltiples errores en la salida. Además, en un codificador, la salida estará en concordancia con el estado de la entrada, y si los polinomios generadores tienen coeficientes comunes, esto afectará la relación entre entrada y salida. Estos conceptos son relevantes en el contexto de los sistemas de codificación y corrección de errores. (Romero et al., 2016)

Acá se tiene en cuenta lo siguiente:

Polinomios Generadores

$P_1 = D + 1$

$P_2 = D + D^2$

(D+1) es Factor común de los Polinomios generadores

7.13. Algunas estructuras de códigos de convolución empleados

r	K	Vectores de conexión
1/2	3	111 $P_1=1 + D + D^2$ 101 $P_2= 1+ D^2$
1/2	4	1111 $P_1 = 1+D+D^2+D^3$ 1011 $P_2 = 1+D^2+D^3$
1/2	7	1001111 1101101
1/3	3	111 111 101

Fig. 112. Estructuras de Códigos con sus vectores de conexión.

Códigos de convolución que se pueden tener en un servicio de comunicaciones:

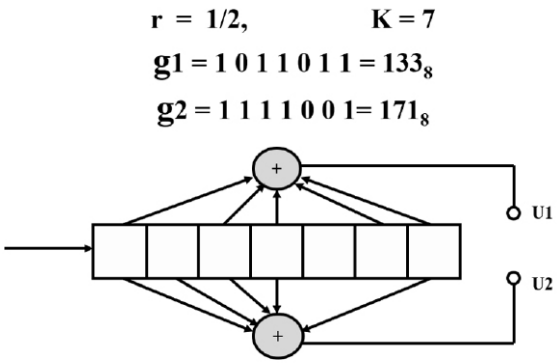


Fig. 113. Ejemplo Códigos de convolución en un Servicio

La técnica de corrección de errores con códigos de convolución es una alternativa valiosa en situaciones en las que la retroalimentación automática (ARQ) no es aplicable o no es la opción deseada. Es especialmente útil en entornos con circuitos de larga propagación temporal,

donde la implementación de un sistema ARQ podría no ser viable. Además, es factible de utilizar en transmisores simples, mientras que múltiples receptores pueden beneficiarse de códigos convolucionales para lograr una decodificación óptima, especialmente cuando se trabaja con valores pequeños de K. (Sundberg, 1986)

La "ventaja de codificación" de un código convolucional se refiere a la mejora en la calidad y la eficacia de la comunicación que se obtiene al aplicar esta técnica. Se busca una estructura de códigos recomendada que optimice el proceso de codificación y decodificación para cumplir con los requisitos específicos de la aplicación.

La corrección de errores con códigos de convolución es una técnica valiosa cuando ARQ no es aplicable o preferible. Es eficaz en circuitos de larga propagación temporal y puede lograr una decodificación óptima utilizando el algoritmo de Viterbi, especialmente en sistemas con valores pequeños de K. La "ventaja de codificación" se refiere a la mejora en la calidad de la comunicación que se obtiene a través de esta técnica. La estructura de códigos recomendada es esencial para optimizar el proceso de codificación y decodificación. (Sundberg, 1986; Yadav et al., 2023)

CAPÍTULO 8

CÓDIGOS PARA ENLACE DE DATOS

Data Link Codes

Resumen

Los códigos de enlace de datos son técnicas esenciales que se utilizan para garantizar la integridad de los datos durante las comunicaciones. Estas técnicas se centran en la detección y corrección de errores que pueden surgir durante la transmisión de información. Los errores pueden presentarse de diversas formas, pero los más comunes son los errores de bits y los errores específicos del enlace de datos. Para detectar estos errores, se recurre a técnicas de Comprobación Cíclica de Redundancia (CRC), que incluyen métodos como la Comprobación de Redundancia Vertical (VRC) y la Comprobación de Redundancia Longitudinal (LRC). Estas estrategias permiten identificar cualquier irregularidad en la comunicación y tomar medidas al respecto. El Código Hamming es una técnica especializada que se utiliza para detectar y, en algunos casos, corregir errores que afectan a un solo bit. Además de estas técnicas, se implementan métodos de control de errores, como la Petición de Repetición Automática (ARQ), y se coordinan las actividades de enlace mediante técnicas como el sondeo y la selección. El control de flujo también juega un papel crucial en el protocolo de Enlace de Datos. Los códigos de enlace de datos desempeñan un papel fundamental en la garantía de que los datos se transmitan con precisión y confiabilidad durante la comunicación. Estas técnicas son esenciales para mantener la integridad de los datos en un mundo interconectado y en constante comunicación.

Palabras clave: CRC, VRC, LRC, ARQ

Abstract

Data link codes are essential techniques used to ensure data integrity during communications. These techniques focus on error detection and correction that may arise during data transmission. Errors can manifest in various forms, with the most common being bit errors and specific data link errors. To detect these errors, techniques like Cyclic Redundancy Check (CRC) are employed, including methods such as Vertical Redundancy Check (VRC) and Longitudinal Redundancy Check (LRC). These strategies enable the identification of irregularities in communication and appropriate actions to be taken. Hamming Code is a specialized technique used to detect and, in some cases, correct errors affecting individual bits. In addition to these techniques, error control methods, such as Automatic Repeat Request (ARQ), are implemented, and link activities are coordinated through techniques like polling and selection. Flow control also plays a crucial role in the Data Link protocol. Data link codes play a fundamental role in ensuring that data is transmitted accurately and reliably during communication. These techniques are essential for maintaining data integrity in an interconnected and constantly communicating world.

Keywords: CRC, VRC, LRC, ARQ.

8.1. Control de errores

8.1.1. Tipos de errores

Error de Bit: Un "error de bit" se produce cuando ocurre una alteración en un único bit dentro de una unidad de información o conjunto de datos específico, provocando un cambio de estado de 1 a 0 o de 0 a 1. En otras palabras, se refiere a la situación en la que un solo bit experimenta un cambio no intencionado de su valor dentro de la información.

Este tipo de error de bit puede surgir por diversas razones, como interferencia durante la transmisión de datos, problemas en la escritura o lectura de información, o incluso debido a la manipulación maliciosa o la corrupción de datos. Detectar y corregir estos errores de bit es de vital importancia para mantener la integridad de los datos, particularmente en aplicaciones de comunicación y almacenamiento de información. (Couch, 2013; Zhang et al., 2023)

Cuando se trata de la detección y corrección de errores, es esencial contar con mecanismos adecuados para identificar y rectificar estos errores de bit, ya que pueden tener un impacto significativo en la calidad y precisión de la información transmitida o almacenada. La capacidad de gestionar y mitigar estos errores es fundamental en sistemas de comunicación y en la protección de datos críticos.

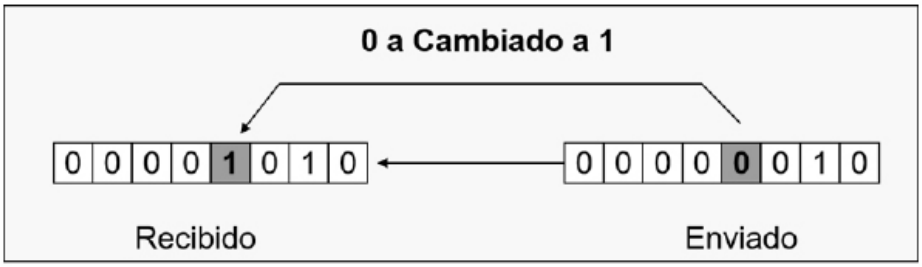


Fig. 114. Error de Bit

Los errores de bit son más comunes en transmisiones paralelas y tienden a ser menos probables en transmisiones seriales. Esto se debe a que, en las transmisiones paralelas, múltiples bits se transmiten simultáneamente, lo que aumenta la probabilidad de que al menos uno de los bits experimente un cambio de estado no deseado. Por otro lado, en las transmisiones seriales, los bits se transmiten uno tras otro, lo que reduce la posibilidad de errores de bit. (Couch, 2013)

Por otro lado, el "error de ráfaga" implica que dos o más bits dentro de una unidad de datos han experimentado un cambio de estado de

1 a 0 o de 0 a 1. Es importante destacar que la noción de "ráfaga" no significa necesariamente que estos errores ocurran en una secuencia consecutiva de bits. En su lugar, se refiere a que dos o más bits dentro de la unidad de datos han experimentado cambios de estado no intencionados. La longitud de una ráfaga binaria se mide desde el primer bit erróneo hasta el último bit. (Enrique, 2004)

Fig. 115. Error de Ráfaga.

En la práctica, estos errores de ráfaga suelen manifestarse en transmisiones seriales. Es decir, los errores de ráfaga tienden a ocurrir en situaciones en las que los bits se transmiten uno detrás de otro, en lugar de transmitirse de manera paralela. La detección y corrección de errores de ráfaga son esenciales en sistemas de comunicación y almacenamiento de datos, ya que pueden tener un impacto significativo en la integridad de la información transmitida o almacenada.

8.2. Control De Errores

Este concepto se refiere a la gestión de los procedimientos requeridos para identificar y rectificar los errores que suceden durante la transmisión de paquetes de datos. En un sistema de comunicación o transmisión de información, es crucial contar con mecanismos efectivos para detectar y corregir cualquier error que pueda surgir en las tramas o paquetes de datos enviados.

Los errores durante la transmisión pueden deberse a una variedad de factores, como interferencia en la señal, ruido, problemas en la transmisión, entre otros. La detección y corrección de errores son fundamentales para garantizar que los datos se transmitan de manera precisa y confiable. En la práctica, esto implica el uso de técnicas específicas, como códigos de corrección de errores, checksums o algoritmos de corrección, que permiten detectar y, en algunos casos, corregir los errores que puedan surgir durante la transmisión de datos.

La detección y corrección de errores en la transmisión de tramas o paquetes de datos son procesos esenciales en sistemas de comunicación y transmisión de información. Estos mecanismos aseguran que los datos se transmitan de manera precisa y confiable, incluso en presencia de posibles errores durante el proceso de transmisión. (Pinto García, 2015)

8.2.1. Dos Posibles Errores

En el contexto de la comunicación de datos, es importante considerar la posibilidad de errores que pueden ocurrir durante el proceso. Estos errores se pueden clasificar en dos categorías principales:

Tramas perdidas: Estos se refieren a los DL_PDUs (Unidades de Datos de Enlace Descendente) que no llegan al destinatario como se esperaba. Es decir, estas tramas se pierden en el proceso de transmisión y no alcanzan su destino previsto.

Tramas erróneas: En este caso, las DL_PDUs sí llegan al receptor, pero su contenido se encuentra dañado o incorrecto de alguna manera. Esto significa que, a pesar de llegar al destino, la información contenida en estas tramas no es la que se envió originalmente.

Para gestionar y mitigar estos errores, se emplean técnicas de control de errores a nivel de enlace de datos. Estas técnicas se basan en dos aspectos clave:

- **Detección de errores:** Consiste en la identificación de tramas defectuosas. En otras palabras, se busca reconocer cuándo una trama ha sufrido un error durante la transmisión.
- **Corrección de errores:** Se refiere a la capacidad de corregir las tramas que presentan errores. Esto implica la restauración de la información en las tramas para que coincida con la información original, incluso si se ha dañado en el proceso de transmisión.

Cuando se trata de la corrección de errores, es importante tener en cuenta que las técnicas pueden abordar tanto errores por bit (cuando uno o varios bits de una trama se alteran) como errores de ráfaga (cuando dos o más bits adyacentes se ven afectados).

Las técnicas de control de errores a nivel de enlace de datos tienen como objetivo detectar y, en algunos casos, corregir errores en las tramas durante la transmisión de datos. Esto se logra mediante la identificación de tramas defectuosas y la corrección de las tramas dañadas, lo que es fundamental para garantizar una comunicación precisa y confiable. (Miller, 2002)

8.3. Dos Tipos de Corrección de Errores

La corrección de errores de extremo a extremo, abreviada como FEC, es un proceso fundamental en la transmisión de datos. En este enfoque, los errores presentes en las tramas de datos se corrigen en el extremo receptor, es decir, en el destino de los datos. Para llevar a cabo esta corrección, se emplea un mecanismo denominado Automatic Repeat Request (ARQ), que solicita la retransmisión de las tramas cuando se detectan errores.

El proceso de detección de errores implica la adición de bits o bytes adicionales a las tramas para permitir la identificación de errores en partes específicas de los datos. Uno de los métodos comunes para la detección es el Frame Check Sequence (FCS). Este valor se calcula a

partir de los datos de la trama y se agrega antes de la transmisión.

El transmisor, o Tx, calcula el valor de estos bits adicionales, como el FCS, antes de enviar la trama. Por su parte, el receptor realiza el mismo cálculo en la trama recibida para asegurarse de que los bits adicionales coincidan. En caso de que se detecte un error en los bits adicionales o en la trama en sí, el receptor solicita al transmisor la retransmisión de la trama.

La corrección de errores de extremo a extremo, o FEC, se define como un proceso crítico para garantizar la integridad de la comunicación de datos. En este enfoque, los errores se corrigen en el extremo receptor, con la ayuda del mecanismo ARQ y técnicas de detección, como el FCS. Este proceso es esencial para garantizar una transmisión de datos precisa y confiable. (Menso, 2020)

8.4 Cuatro tipos de comprobación de errores

De esto se tienen los siguientes:

VCR: Verificación de redundancia vertical o Vertical Redundancy Check.

LRC: Comprobación de redundancia longitudinal o Longitudinal Redundancy Check

CRC: Comprobación de redundancia cíclica o Cyclic Redundancy Check.

Checksum: Suma de comprobación.

8.5. Detección de Errores por Verificación de Redundancia Vertical (VRC)

El concepto de comprobación de paridad implica la inclusión de un bit adicional en el carácter transmitido, lo que permite detectar errores pares (paridad par) o impares (paridad impar) en un solo bit adicional. En esencia, esta técnica proporciona una forma sencilla de

detectar errores en la transmisión de datos al verificar si la cantidad de unos en un conjunto de bits es par o impar.

La comprobación de paridad se vuelve especialmente útil en la detección de errores de ráfaga cuando el número total de errores es impar. Esto significa que si se produce un número impar de errores en la transmisión, la comprobación de paridad será capaz de detectarlos y señalar que ha ocurrido un problema en la comunicación.

La comprobación de paridad es una técnica que utiliza un bit adicional para detectar errores en la transmisión de datos, y su eficacia radica en la detección de errores de ráfaga cuando el número total de errores es impar. Esta técnica proporciona una forma simple pero efectiva de garantizar la integridad de la información durante la comunicación. (Romero et al., 2016)

Esquema del VRC

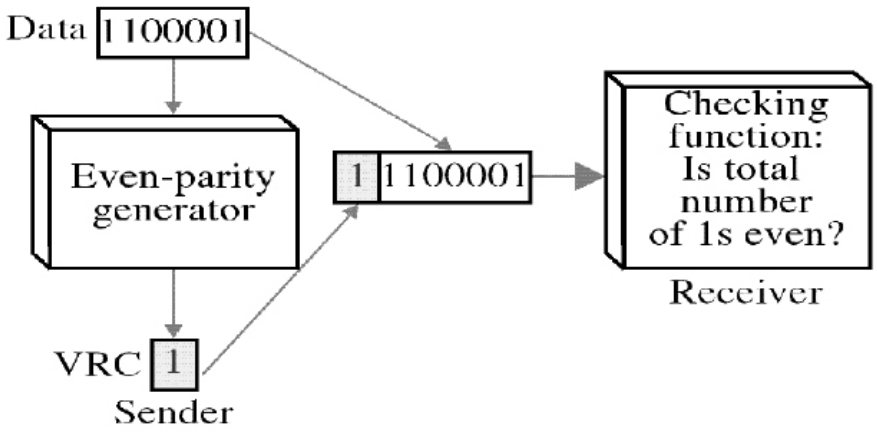


Fig. 116. Detección de errores VRC

8.5.1 Ejemplo 1

Paridad par.

Emisor quiere enviar la palabra “hola”.

Cada carácter ocupa 7 bits.

Codificación ASCII.

1101000 1101111 1101100 1100001

Bits enviados realmente:

1101000 **1** 1101111 **0** 1101100 **0** 1100001 **1**

8.5.2 Ejemplo 2.

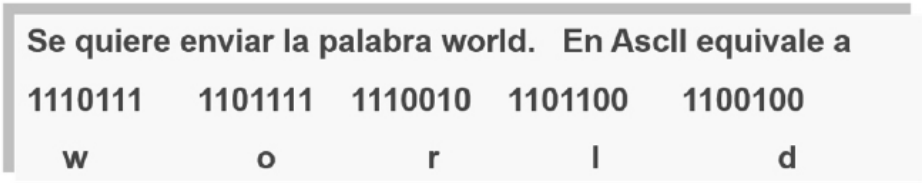


Fig. 117. Ejemplo 2

Los Bits enviados:

1110111**0** 1101111**0** 1110010**0** 1101100**0** 1100100**1**

8.5.3 Ejemplo 3

Considere si en esta instancia, ha ocurrido una corrupción y se recibe lo siguiente

111**1**111<u>0</u> 1101111**<u>0</u>** 1110**1**10<u>0</u> 1101100**<u>0</u>** 1100100**<u>1</u>**

Al verificar los bits se descarta la trama

El VRC, o Comprobación de Redundancia Vertical, tiene la capacidad de identificar todos los errores que involucran un solo bit. Sin embargo, su capacidad de detectar errores de ráfaga está condicionada a una peculiaridad: solo será eficaz en la detección de errores de ráfaga si el número total de errores presentes en cada unidad de datos es impar. (Proakis & Salehi, 2002)

Esto significa que el VRC puede ser efectivo para señalar la presencia de errores individuales en la información transmitida. Cuando un solo bit se modifica incorrectamente, el VRC lo detectará y emitirá una señal de alerta. No obstante, en el contexto de errores de ráfaga, donde múltiples bits contiguos pueden verse afectados, el VRC solo podrá identificarlos si la cantidad total de errores es un número impar. (Tomasi, 2003)

El VRC es una técnica que destaca por su capacidad para detectar errores de bit único, aunque su habilidad para identificar errores de ráfaga depende de que el número total de errores en cada unidad de datos sea un número impar. Esto es importante para garantizar que la integridad de la información sea preservada en la comunicación. (Proakis & Salehi, 2002)

8.6. Detección de Errores de Verificación de Redundancia Longitudinal (LRC)

La detección de errores a través del uso de la Comprobación de Redundancia Longitudinal (LRC) es un proceso que implica organizar las cadenas de bits en un marco de datos en una estructura de tabla, con filas y columnas. Para cada columna de esta tabla, se realiza un cálculo de paridad o se agrega un bit de paridad, que refleja la paridad de los bits en esa columna. Este flujo computacional resultante se incorpora en la trama de datos que será transmitida. La principal función de este proceso es detectar errores consecutivos de un tamaño específico, que se corresponde con el número de bits generados por el LRC.

La detección de errores con LRC se basa en organizar los datos en una estructura de tabla, calcular la paridad para cada columna y agregar este flujo de información en la trama de datos. Su utilidad radica en la capacidad de detectar errores consecutivos que tengan la longitud específica determinada por el número de bits generados por el LRC.

Esto contribuye a mantener la integridad de la información durante la comunicación.

Esquema del LRC

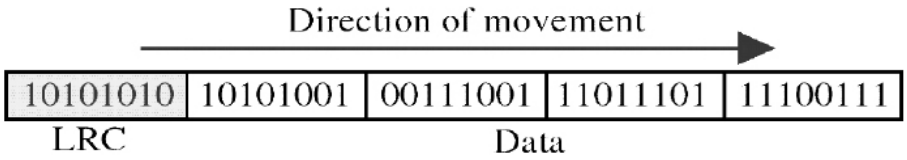


Fig. 118. Detección de errores LRC

8.6.1 Ejemplo 1

Trama de 32 bits organizada en 4 filas de 8 columnas.

Paridad par.

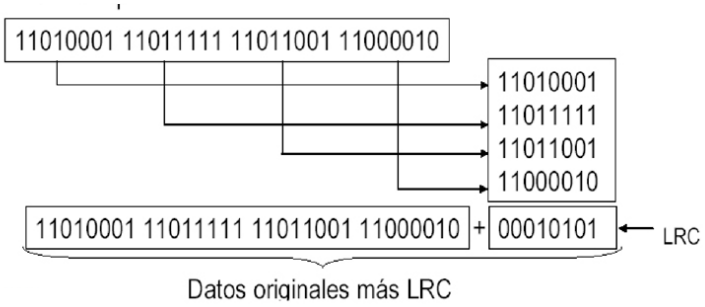


Fig. 119. Ejemplo 1 de detección de errores LRC

8.6.2 Ejemplo 2.

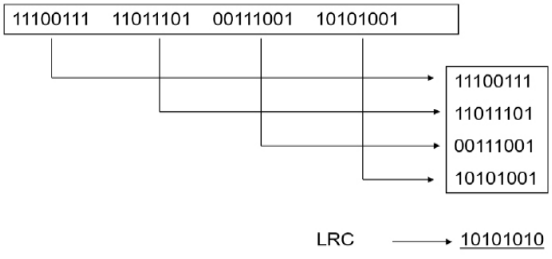


Fig. 120. Ejemplo 2 de detección de errores LRC

Esta es la totalidad de los datos enviados:

11100111 11011101 00111001 10101001 10101010

8.7. Detección de errores por Verificación de Redundancia Cíclica (CRC)

Este método de detección de errores es más robusto y avanzado que nunca, y se basa en el concepto de división binaria. En su esencia, implica generar una secuencia de bits redundantes, conocida como CRC o CRC residual, y añadirla al final de una trama de datos mediante la división de los bits de la trama por un número binario predefinido, denominado divisor. Una parte esencial de este proceso es el cálculo del Código de Detección de Errores (KDF). Es importante notar que el número de bits utilizados para el CRC debe ser menor que el número de bits del divisor. (Miller, 2002)

El proceso de cálculo del CRC, a menudo referido como Txor, se compone de varios pasos:

1. Se añaden n ceros a la trama, siendo n igual al número de bits del divisor más uno.
2. La trama resultante se somete a una división binaria utilizando el denominador de la división (división módulo 2). El residuo de esta operación se convierte en el CRC.
3. Para formar el CRC con ceros, se añaden n bits adicionales a la secuencia.
4. En el extremo receptor, Rxor, se toma la trama que incluye el CRC y se procede a dividirla en segmentos. Si el residuo de esta división es igual a cero, esto indica que no se han producido errores en la transmisión.

Este método de detección de errores es altamente efectivo y se basa en la división binaria. Se genera un CRC que se añade a la trama y

se verifica en el receptor mediante la división de la trama y la comprobación del residuo. Esto garantiza la integridad de la información durante la comunicación. (Carlson, 2007; Haykin, 2005)

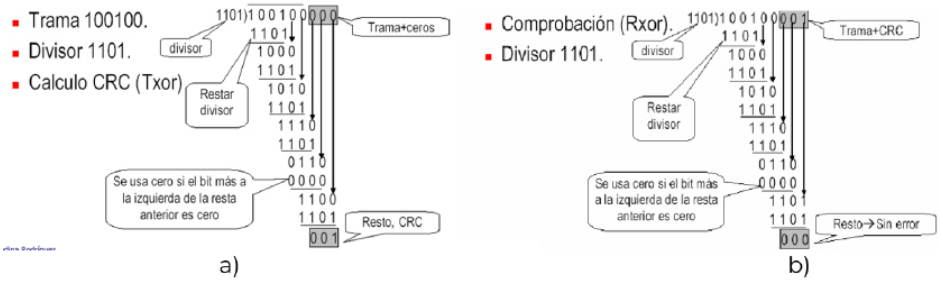


Fig. 121. Control errores: Detección de errores CRC. a) Transmisor & b) Receptor

Los divisores se representan como polinomio algebraico.

Por ejemplo, el divisor 10100111 se representa como el polinomio:

$$x^7+x^5+x^2+x+1$$

Polinomios estándares:

CRC-12: $x^{12}+x^{11}+x^3+x+1$

CRC-16: $x^{16}+x^{15}+x^2+x+1$

CRC-IUT-T: $x^{16}+x^{12}+x^5+1$

CRC-32: $x^{32}+x^{26}+x^{23}+x^{22}+x^{16}+x^{12}+x^{11}+x^{10}+x^8+x^5+x^4+x^2+1$

El método detecta errores de ráfagas que afectan a un número impar de bits y ráfagas de longitud menor o igual que el grado del polinomio.

8.8. Detección de Errores por Suma de Comprobación o Checksum

El método de detección de errores conocido como "Checksum" o "Suma de Comprobación" es una técnica común en el nivel superior de la comunicación de datos. Su enfoque radica en identificar errores relacionados con un número impar de bits en una trama de datos. (Medina Delgado et al., 2017)

El proceso de cálculo del Checksum, a menudo denominado Txor, consta de los siguientes pasos:

1. La trama de datos se divide en k segmentos de n bits, considerando tanto los datos originales como sus complementos aritméticos.
2. Se realiza un cálculo que resulta en una suma de comprobación, que se incorpora a la trama.

Por otro lado, el proceso de verificación en el receptor, Rxor, se desarrolla de la siguiente manera:

1. La trama, incluyendo la suma de comprobación, se divide en k bloques, cada uno de n bits de longitud.
2. Cada bloque se asocia con su bloque complementario aritmético.
3. Se niega el resultado obtenido. Si el resultado final es igual a cero, se concluye que no se han producido errores en la transmisión.

El método de detección de errores basado en la Suma de Comprobación o *Checksum* es una técnica eficaz para capturar errores relacionados con un número impar de bits en una trama de datos. Tanto en la transmisión como en la recepción, se realizan cálculos y verificaciones específicas que permiten determinar si la información se ha transmitido con integridad. (Lathi, 2004)

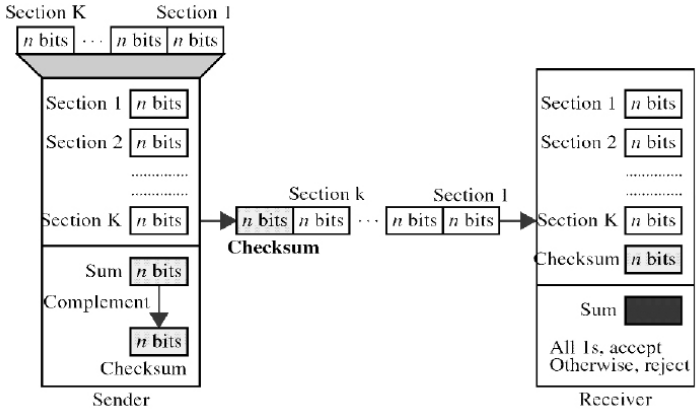


Fig. 122. Verificación por Checksum

8.9. Ejemplo Checksum

- Trama 1010100100111001.
- Checksum de 8 bits.

```
10101001
00111001
11100010   Suma C-1
00011101   Checksum
```

- Trama resultante 1010100100111001000111001

- Rxor recibe trama 1010100100111001000111001
- Comprobación

```
10101001
00111001
00011101
11111111   Suma C-1
00000000   Complemento
```

Fig. 123. Ejemplo Checksum.

8.10. Corrección de Errores

Dentro de los mecanismos de corrección de errores se tienen los siguientes:

- Forward Error Correction (FEC)
- Corrección de errores de un único bit
- Código de Hamming
- Automatic Repeat Request (ARQ)

8.10.1. Técnica de Corrección de Errores o Forward Error Correction (FEC)

La técnica de Corrección de Errores FEC, o Forward Error Correction, se basa en un proceso de codificación en el que cada bloque de k bits de una trama se transforma en una palabra de n bits, con la condición de que n sea mayor que k (n>k). En el extremo transmisor, Txor, se realiza este proceso de codificación, y la trama resultante se envía a través del canal de comunicación, incluso si contiene errores. (Romero et al., 2016)

La clave de la FEC radica en la incorporación de un bit adicional, denominado redundancia, que cumple dos funciones fundamentales. En primer lugar, ayuda a detectar la presencia de errores en la trama transmitida. En segundo lugar, facilita la predicción de qué datos se enviaron originalmente.

En el receptor, Rxor, se lleva a cabo la decodificación de las palabras del bloque original, incluso si han experimentado errores durante la transmisión. La redundancia es fundamental para realizar esta corrección y recuperar la información original de manera precisa.

La técnica de Corrección de Errores FEC se basa en la codificación de bloques de datos, donde se añade redundancia para detectar errores y permitir la recuperación de la información original en el receptor, incluso si la trama ha experimentado alteraciones durante la transmisión. Esto resulta en una mayor confiabilidad en la comunicación de datos. (Tanenbaum, 2003)

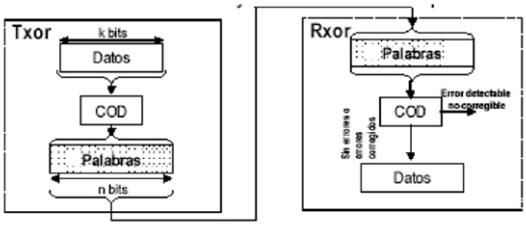


Fig. 124. Corrección de errores FEC

8.10.2. Corrección de errores en un único bit

Además de la detección de errores, un aspecto crucial en la comunicación de datos es la corrección de estos errores, que implica identificar en qué bit específico se ha producido el fallo. Por ejemplo, para corregir un error de un solo bit en un carácter ASCII de 7 bits, es esencial determinar el bit exacto donde se ha producido la alteración. Lograr esto requiere la inclusión de suficientes bits redundantes en la transmisión para especificar todos los posibles estados. (Menso, 2020)

Para determinar la cantidad de bits redundantes necesarios, se debe establecer una relación entre la cantidad de bits de datos originales (m) y la cantidad de bits redundantes (r). Esto se realiza a través de un proceso que debe satisfacer una serie de ecuaciones específicas.

En esencia, el objetivo es encontrar el equilibrio adecuado entre la cantidad de bits de datos originales y la cantidad de bits redundantes para garantizar una detección y corrección eficiente de errores. Estas ecuaciones proporcionan las pautas necesarias para diseñar un sistema de corrección de errores que sea efectivo en la identificación y solución de errores en la transmisión de datos. Deben satisfacerse las siguientes ecuaciones:

$$2^r \geq m + r + 1$$

Ejemplo: Si el Número de bits a transmitir es 7 entonces:

$$m = 7$$

Sustituyendo se ve que r = 4 satisface la ecuación

$$2^4 \geq 7 + 4 + 1$$

Numero de bit de datos (m)	Numero de Bit de Redundancia (r)	Bits Totales (m+r)
1	2	3
2	3	5
3	3	6
4	3	7
5	4	9
6	4	10
7	4	11

Fig. 125. Bits de Redundancia. Relación entre bits de datos y bits de redundancia.

8.10.3. El código Hamming

Inventado por Richard Hamming en 1950, el Código Hamming es una técnica ingeniosa que permite la manipulación de bits para abordar todas las posibles condiciones de error en la transmisión de datos. Esta técnica es versátil, ya que se puede aplicar a unidades de datos de diversas longitudes y se basa en la relación entre bits de datos y bits de paridad. (Medina Delgado et al., 2017)

El Código Hamming se fundamenta en dos conceptos fundamentales. En primer lugar, divide el mensaje en dos partes: los bits de datos y los bits de paridad, que se utilizan para verificar la integridad del mensaje. Este enfoque se apoya en el concepto de similitud, que consiste en determinar el valor de los bits de paridad en función de los bits de datos. Esto se basa en la paridad impar, lo que significa que un bit tendrá un valor determinado siempre que el peso del bit sea impar.

Tómese como un ejemplo clásico, el código ASCII de 7 bits. Para garantizar la detección y corrección de errores, se agregan 4 bits de pa-

ridad al final de una unidad de datos o se anexan al bit de datos original. Cada combinación de datos de r bits en el código Hamming está acompañada por un bit de Paridad VRC, que permite identificar y solucionar errores en la transmisión.

Este código concebido por Richard Hamming, es una técnica versátil que se basa en la manipulación de bits para abordar y corregir errores en la transmisión de datos. Utiliza una combinación de bits de datos y bits de paridad para garantizar la integridad de la información, y puede aplicarse a diversas longitudes de unidades de datos. (Tropena, 2006)

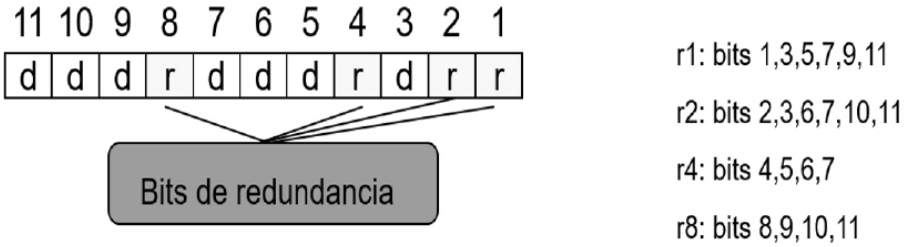


Fig. 126. Código ASCII de 7 bits necesita 4 bits de redundancia

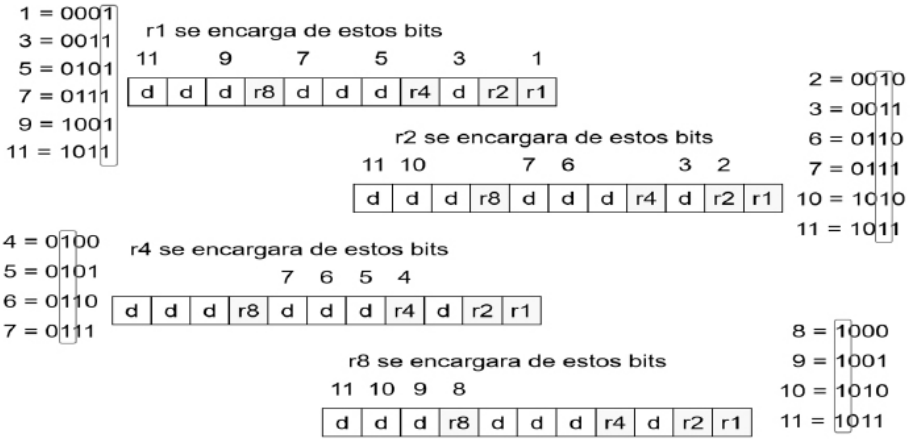


Fig. 127. Código Hamming cada bit r es el bit VRC.

Datos para prueba 1001101

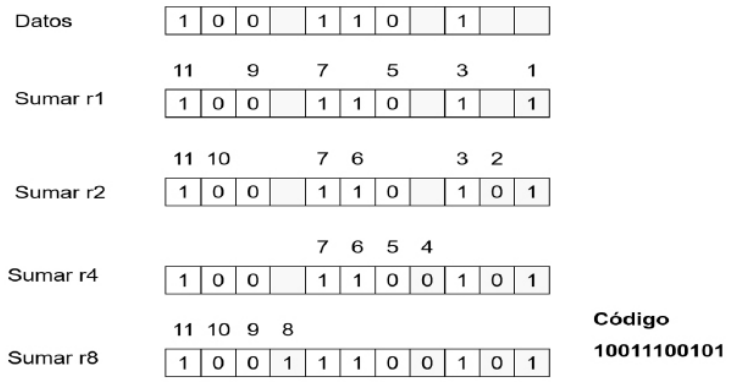


Fig. 128. Datos: 1001101

8.11. Detección y Corrección de Errores

En el proceso de recuperación de datos, el receptor realiza una operación crucial. Utiliza los mismos bits que el emisor y los respectivos bits redundantes (r) de cada grupo. Luego, se lleva a cabo el cálculo de cuatro nuevos valores de CRC. Estos nuevos valores de paridad se transforman en números binarios siguiendo un orden espacial específico, que generalmente es r (r8r4r2r1).

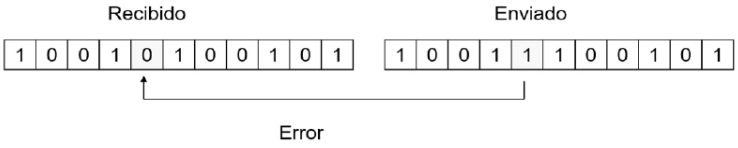


Fig. 129. Detección y Corrección de Errores

Para ilustrar este procedimiento, considere un ejemplo. Tras realizar estos pasos, se obtiene un número binario, como 0111 (que corresponde a 7 en notación decimal). Este número binario es particularmente relevante, ya que señala la ubicación precisa del bit con errores en la transmisión. La capacidad de determinar la ubicación del bit defec-

tuoso es esencial para corregir errores y garantizar la integridad de los datos recuperados. Esto se ve en la Figura 130. (Buehler & Lunden, 1966)

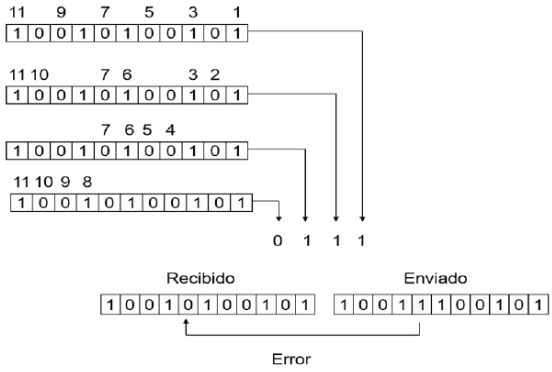


Fig. 130. Ejemplo Detección y Corrección de Errores

8.12. Mecanismos para Control de Errores

8.12.1. Petición de Repetición Automática (ARQ)

La corrección de errores a nivel de enlace de datos se lleva a cabo de manera eficiente y efectiva. Cuando se detecta un error en el intercambio de la comunicación, se devuelve un acuse de recibo negativo (NACK) y se vuelve a enviar de la forma definida. Se activa un mecanismo conocido como Reconocimiento Automático de Solicitud de Repetición (ARQ, por sus siglas en inglés). ARQ se encarga de garantizar la integridad de la transmisión y esencialmente opera en tres situaciones:

1. Tramas Dañadas: En el caso de que una trama haya sufrido daños durante la transmisión, ARQ detecta esta anomalía y envía un acuse de recibo negativo (NACK), indicando que se debe retransmitir la trama.

2. Tramas Perdidas: Si una trama no llega a su destino, lo que se conoce como una trama perdida, ARQ se activa nuevamente. Se envía un NACK para solicitar la retransmisión de la trama ausente.

3. Reconocimiento Perdido: Cuando no se recibe el reconocimiento esperado para una trama transmitida, ARQ actúa de manera proactiva. Detecta la falta de reconocimiento y solicita la retransmisión de la trama, asegurando que la comunicación se mantenga fluida.

El proceso de ARQ es utilizado para corregir errores a nivel de enlace de datos, se enfoca en detectar tramas dañadas, tramas perdidas y reconocimientos no recibidos. En cada uno de estos casos, se solicita la retransmisión de la información para garantizar una comunicación confiable y sin errores.

8.12.2. Solicitud de Repetición Automática (ARQ).

Esto se implementa con:

- ARQ con parada y espera.
- ARQ con vuelta atrás N.
- ARQ con rechazo selectivo (retransmisión selectiva).

8.12.3. ARQ con Parada y Espera

El proceso de transmisión de datos y su confirmación es fundamental en las comunicaciones. Cuando una estación de origen envía una trama de datos, espera una confirmación en forma de un acuse de recibo (ACK) de la estación receptora. Esta confirmación es esencial para asegurarse de que la trama se ha entregado correctamente. Sin embargo, en ocasiones, las tramas pueden resultar dañadas durante la transmisión debido a interferencias o problemas en la red. En tales casos, el receptor rechaza la trama dañada y no envía el ACK esperado. Para evitar la espera indefinida de un ACK que nunca llega, el emisor incorpora un temporizador. Si el temporizador expira sin recibir el ACK, el transmisor asume que la trama no se entregó correctamente y la reenvía. Aun así, hay situaciones en las que el receptor recibe dos copias idénticas de la misma trama de datos, lo que puede generar confusiones. Para abordar este problema, se introducen con-

ceptos como ACK0 y ACK1. Estos acuses de recibo permiten al receptor diferenciar entre las tramas duplicadas y proporcionar una respuesta adecuada al emisor. Este método de confirmación y reenvío de tramas asegura una comunicación confiable y detecta tramas dañadas o perdidas. La utilización de ACKs y temporizadores garantiza que la información se entregue de manera eficaz y evita problemas relacionados con la duplicación de tramas. La ventaja es su Sencillez y el inconveniente es que es un método que se considera Ineficiente:

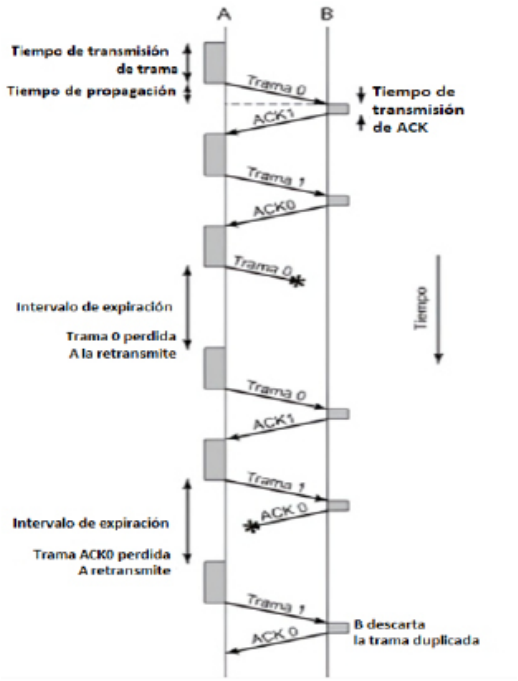


Fig. 131. ARQ con parada y espera

8.12.4. ARQ con vuelta atrás N

Este método se basa en un concepto denominado "control de flujo de ventana deslizante". En condiciones normales, el receptor aceptará las tramas recibidas sin problema, siempre y cuando no se detecten errores en ellas. Para llevar a cabo este control de flujo, se utiliza una

ventana que determina cuántas tramas se pueden aceptar en un momento dado. Cuando se detecta un error en una trama, se envía un acuse de recibo negativo (NACK) y la trama errónea, junto con todas las tramas posteriores que se reciban, se descartan hasta que la trama con error sea recibida y procesada correctamente. Esto implica que el transmisor debe reiniciar y volver a enviar todas las tramas que se transmitieron erróneamente después de la trama problemática. Este enfoque se basa en el control de flujo a través de una ventana deslizante y se asegura de que las tramas con errores se manejen adecuadamente mediante la retransmisión y el reinicio del proceso. Esto contribuye a mantener una comunicación confiable y detectar y corregir problemas de transmisión. (Enrique, 2004)

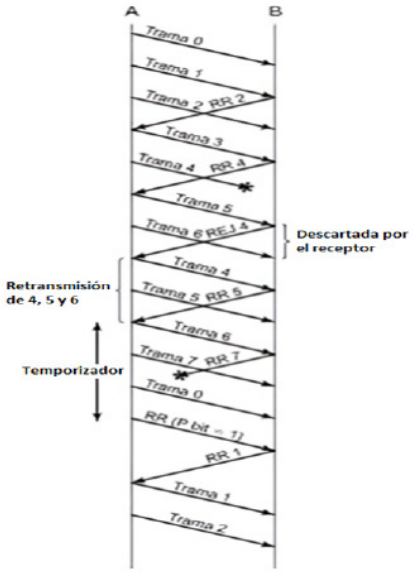


Fig. 132. ARQ *con vuelta atrás* N

8.12.5. ARQ con vuelta atrás N, Trama deteriorada

Cuando el receptor identifica un error en la trama i, procede a enviar una señal denominada "REJ i" al transmisor. Al recibir esta señal, el transmisor reconoce que se ha detectado un problema en la trama i

y, como medida preventiva, debe retransmitir tanto la trama i como todas las tramas que le siguen en la secuencia. Este proceso garantiza que cualquier trama afectada por la presencia de errores, a partir de la trama i, se vuelva a enviar para asegurar una comunicación confiable y corregir los problemas detectados en la transmisión. En resumen, la detección de errores y el uso de REJ i aseguran que las tramas erróneas sean retransmitidas, minimizando así los efectos de errores en la comunicación. (Pierce & Michael Noll, 1995)

8.12.6. ARQ con vuelta atrás N. Trama Perdida.

Cuando se experimenta la pérdida de una trama i durante una comunicación, se desencadena un proceso específico para asegurar que la transmisión continúe de manera efectiva. En primer lugar, el remitente procede a enviar la trama i+1 en un intento de reanudar la comunicación. Sin embargo, en el lado receptor, la trama i+1 se recibe fuera de servicio, lo que indica que se ha producido un problema en la secuencia.

En respuesta a esta situación, el destinatario envía una señal denominada REJ i, solicitando al remitente que regrese a la trama i y la retransmita, ya que la trama i se ha perdido y no se han enviado otras tramas. En este escenario, el receptor no recibe ninguna información adicional y no envía acuses de recibo ni más solicitudes de REJ. El transmisor, ante la expiración de un temporizador, envía una trama de reconocimiento especial en la que incluye un bit P, configurado en 1.

Esto se interpreta como una indicación de que se desea reconocer la trama siguiente en la secuencia, es decir, la trama i. Como resultado, el remitente retransmite la trama i para corregir la pérdida y permitir que la comunicación continúe sin problemas. Este proceso asegura que se atiendan los errores y se garantice una comunicación confiable. (Tomasi, 2003)

8.12.7. ARQ con vuelta atrás N. Confirmación Dañada

Cuando el receptor recibe la trama i durante la comunicación, lo que sigue es enviar un acuse de recibo correspondiente a la trama i+1. Sin embargo, en ocasiones, este acuse de recibo (i+1) se pierde en el proceso de transmisión. Es importante destacar que las confirmaciones en esta configuración son acumulativas, lo que significa que la siguiente confirmación (i+n) puede emitirse antes de que expire el temporizador del remitente que está asociado con la trama i. En caso de que el temporizador del remitente llegue a expirar, se activa la transmisión de un acuse de recibo que incluye el bit P configurado de la misma manera que se ha descrito anteriormente. Este procedimiento puede repetirse varias veces antes de que se considere necesario iniciar un proceso de reinicio. Es decir, se permite una serie de intentos para lograr la recepción exitosa del acuse de recibo por parte del remitente antes de tomar medidas más drásticas o considerar la necesidad de una reconfiguración completa del proceso de comunicación. Este enfoque acumulativo y las repeticiones son elementos clave para garantizar una comunicación efectiva y confiable entre el remitente y el receptor. (Sundberg, 1986)

8.12.8. ARQ con Rechazo Selectivo

Este enfoque, conocido como retransmisión selectiva, se diferencia en que solo las tramas que han recibido un reconocimiento negativo se retransmiten. El receptor, por su parte, acepta las tramas posteriores y las almacena en una memoria temporal. Esto se traduce en una disminución significativa del número de retransmisiones necesarias para mantener una comunicación efectiva. No obstante, es importante señalar que el receptor debe contar con una memoria temporal lo suficientemente amplia para retener estas tramas, lo que añade cierta complejidad a su funcionalidad. Asimismo, el transmisor o remitente también requiere una lógica más elaborada para gestionar este proceso de retransmisión selectiva de manera eficiente y precisa.

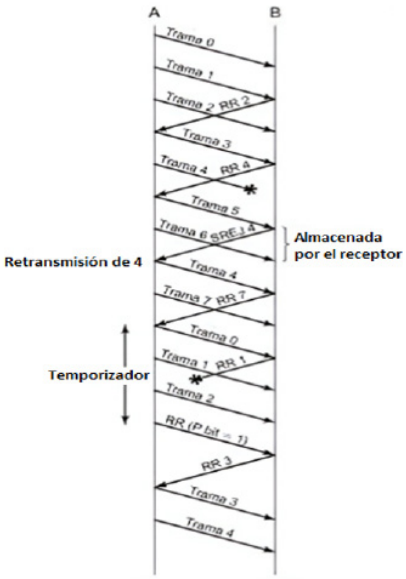


Fig. 133. ARQ con rechazo selectivo

8.13. Control del Enlace de Datos.

La disciplina de línea es un componente crucial en la gestión de un sistema de enlace. Su función principal es determinar qué dispositivos están autorizados para enviar información y cuándo pueden hacerlo. El control de flujo, por otro lado, se encarga de regular la cantidad de datos que pueden transmitirse antes de recibir un acuse de recibo, lo que contribuye a mantener un flujo de datos eficiente y evita la congestión en el sistema. Además, el control de flujo también cumple el papel de confirmar al receptor que la trama recibida está completa y no se ha corrompido durante la transmisión. (Romero et al., 2016)

Por otra parte, la comprobación de errores desempeña un papel fundamental al detectar y, en algunos casos, corregir errores en las tramas de datos transmitidas. Esto permite que el receptor pueda identificar y notificar al emisor las tramas que se han perdido o dañado

durante el proceso de transmisión, lo que es esencial para mantener la integridad de los datos y garantizar una comunicación efectiva.

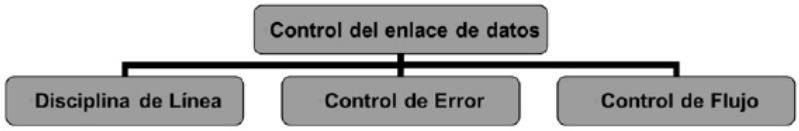


Fig. 134. Control del Enlace de Datos

8.14. Coordinación del Enlace

Esta restricción se aplica con el propósito de prevenir o solucionar problemas comunes relacionados con el acceso a los puestos de trabajo, particularmente en situaciones en las que varios usuarios pueden necesitar acceder a los mismos recursos, lo que puede dar lugar a conflictos o disputas. La conclusión de la espera se encuentra en un horizonte cercano, y existen dos métodos fundamentales para abordar este proceso:

1. Solicitud/Reconocimiento (ENQ/ACK): En este enfoque, un usuario solicita el acceso a un recurso, y se espera que reciba un reconocimiento (ACK) como respuesta, lo que indica que se le ha concedido el permiso para utilizar dicho recurso.

2. Sondeo/Selección: En este método, se realiza una exploración de los usuarios en busca de sus necesidades o solicitudes de acceso a los recursos. Luego, se procede a seleccionar a quién se le otorga el acceso en función de los resultados del sondeo. Esto permite una asignación más controlada de los recursos y evita disputas innecesarias.

8.15. Coordinación del Enlace ENQ/ACK:

Este método se emplea en enlaces de comunicación punto a punto, y se encarga de gestionar cuándo una estación puede comenzar a transmitir y si el receptor está preparado y en un estado activo para reci-

bir. El funcionamiento de este sistema se basa en una serie de señales y procedimientos:

ENQ (Enquiry): Esta señal se utiliza para verificar la disponibilidad del receptor. Se envía para determinar si el receptor está listo y en condiciones de recibir datos. En algunos casos, se pueden realizar hasta tres intentos de ENQ.

ACK (Acknowledgment): Esta señal se utiliza para indicar que el receptor está listo para recibir datos. Cuando el receptor está en un estado activo y listo, se envía una señal ACK como respuesta a la señal ENQ.

NACK (Negative Acknowledgment): La señal NACK se utiliza para informar que el receptor no está en condiciones de recibir datos en ese momento. Es una respuesta negativa a la señal ENQ.

Datos: Esta parte del proceso involucra la transmisión real de datos, que contiene una Unidad de Datos de Servicio (SDU) del nivel superior. Estos datos son transmitidos desde el emisor al receptor.

EOT (End of Transmission): La señal EOT se utiliza para indicar el fin de la transmisión. Marca el punto en el que la comunicación llega a su conclusión.

Este método es eficaz para gestionar las comunicaciones en enlaces punto a punto, asegurándose de que la transmisión se realice cuando el receptor esté listo y activo, lo que mejora la eficiencia y reduce los errores de comunicación. (Miller, 2002)

8.16. Coordinación del enlace. ENQ/ACK.

El método de sondeo/selección se basa en la utilización de una conexión multipunto, donde una de las estaciones asume el rol de estación maestra y el resto actúan como estaciones esclavas. En este escenario, la estación maestra ejerce el control sobre todo el flujo de informa-

ción y determina cuál de las estaciones esclavas puede comenzar la transmisión y si el destinatario está en condiciones de recibir datos y activo en ese momento.

Fig. 135. Coordinación del Enlace. ENQ/ACK. Ejemplo

La estación maestra realiza una selección entre las estaciones esclavas, eligiendo el flujo de información que debe transmitirse primero. El proceso de selección del destinatario de los datos auxiliares implica un intercambio de tres tipos de tramas:

SEL (Select): Esta trama se utiliza para verificar la disponibilidad del receptor y determinar si está preparado para recibir datos. La estación maestra realiza hasta tres intentos de selección antes de proceder con la transmisión.

ACK (Acknowledgment): Cuando el receptor está listo y en un estado activo para recibir datos, responde con una señal ACK, lo que indica que está preparado para la recepción de datos.

Datos: En esta etapa, se envían los datos reales, que contienen una Unidad de Datos de Servicio (SDU) proveniente del nivel superior.

Este enfoque multipunto y jerárquico garantiza que la estación maestra coordine eficientemente la transmisión y que las estaciones esclavas solo actúen cuando están preparadas y activas, lo que mejora la gestión del flujo de información y reduce los errores de comunicación.

8.16.1. Coordinación del Enlace. Sondeo/Selección

El proceso de sondeo se emplea para gestionar el flujo de información entre dos niveles, específicamente entre el segundo nivel y el primero que busca realizar una transferencia de datos. En este intercambio, se utilizan cuatro tipos de tramas que facilitan la comunicación eficaz:

SON (Select): Esta trama se utiliza para verificar si el receptor se encuentra disponible y listo para recibir datos.

ACK (Acknowledgment): La trama ACK es una confirmación de que los datos se han recibido correctamente.

NACK (Negative Acknowledgment): Si no hay datos para transmitir en un momento determinado, se envía una trama NACK para indicar esta condición.

Datos: Las tramas de datos contienen información útil que incluye una Unidad de Datos de Servicio (SDU) del nivel superior.

El intercambio de tramas puede finalizar de diferentes maneras, incluyendo la temporización, es decir, el uso de una trama especial llamada EOT (End of Transmission), que señala el fin de la transmisión y cierra el proceso de comunicación. Este método permite que las dos capas de comunicación se sincronicen eficazmente y gestionen la transferencia de datos de manera organizada y controlada. (Buchman, 1962) (Zhao et al., 2022)

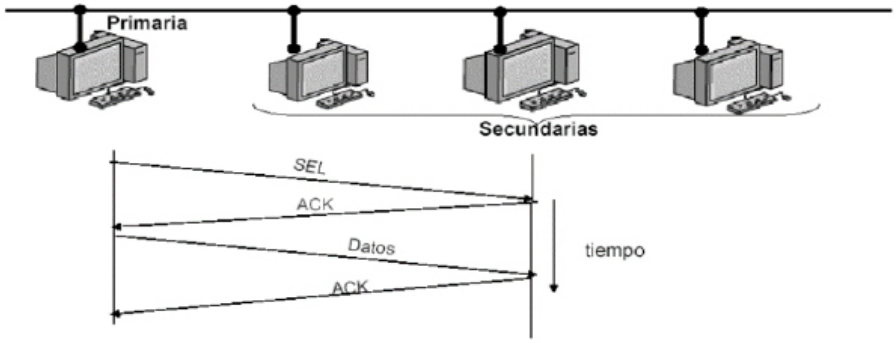


Fig. 136. Coordinación del Enlace. Sondeo/Selección:

8.16.2. Coordinación del Enlace, Sondeo/Selección

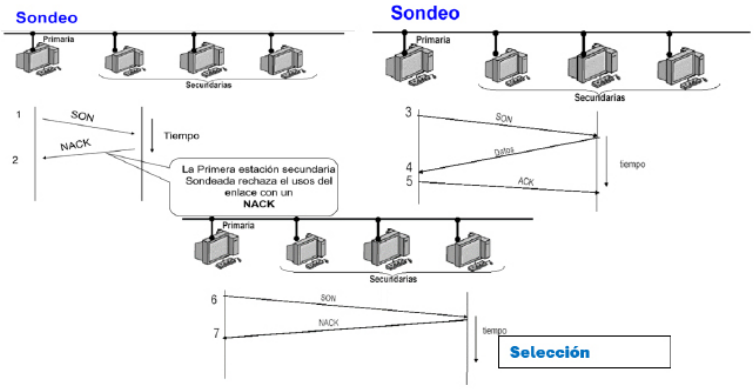


Fig. 137. Coordinación del Enlace, Proceso de Sondeo/Selección

En la **coordinación del enlace de datos**, el **sondeo y selección** son métodos de control utilizados en protocolos de comunicación para gestionar la transmisión de datos entre un nodo principal (como un maestro o controlador) y varios nodos secundarios (como estaciones o dispositivos terminales).

8.17. Procesos de Control de Flujo

El control de flujo es un mecanismo esencial para garantizar que la unidad de transmisión no sobrecargue la unidad receptora, evitando así el desbordamiento de su búfer. Su principal objetivo es ajustar la

velocidad a la que la unidad transmisora (Txor) envía información a la unidad receptora (Rxor), asegurando que esta última no se sature y pueda procesar los datos de manera eficiente. (Cook, 1967)

Este proceso se logra mediante un conjunto de rutinas y técnicas que regulan la cantidad de datos que un emisor puede transmitir antes de recibir una confirmación de recepción (ACK). Esto previene cualquier desbordamiento de datos en el receptor y garantiza una comunicación fluida. (Proakis & Salehi, 2002)

En esencia, existen dos enfoques básicos para el control de flujo: Parada y Espera, conocido como Stop & Wait y Ventana Deslizante. Ambos métodos se utilizan para optimizar la transferencia de datos y evitar posibles problemas de congestión en la comunicación entre emisor y receptor.

8.18. Protocolo Parada y Espera o Stop & Wait

El protocolo Stop & Wait es un enfoque simple y eficaz para la comunicación en un sistema unidireccional, donde el receptor confirma cada trama recibida con un acuse de recibo (ACK). Aunque es una metodología efectiva, tiene limitaciones en términos de uso eficiente de los recursos, particularmente si se supone que los buffers son infinitos, lo que no es realista en la mayoría de las situaciones.

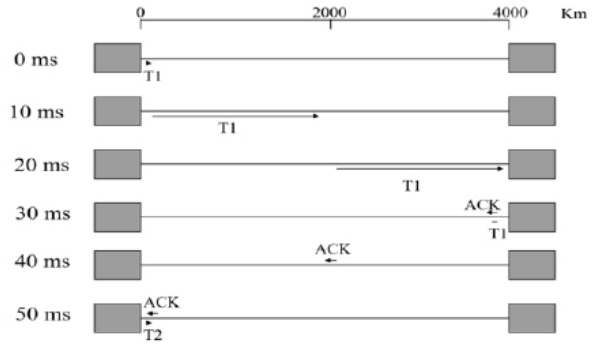


Fig. 138. Protocolo Stop & Wait

Este protocolo se considera un enfoque simplex, lo que significa que la comunicación fluye en una sola dirección, sin un canal de retorno directo para el emisor. Sin embargo, a pesar de su simplicidad, se han introducido mejoras en el protocolo Stop & Wait. Estas mejoras incluyen la incorporación de ACKs (acuses de recibo), el uso de timeouts para gestionar retransmisiones en caso de pérdida de tramas, y la numeración de secuencias para mantener un seguimiento de las tramas transmitidas y recibidas. Estas adiciones permiten un control más efectivo y una comunicación más fiable en un sistema donde la información se envía de un lado a otro.

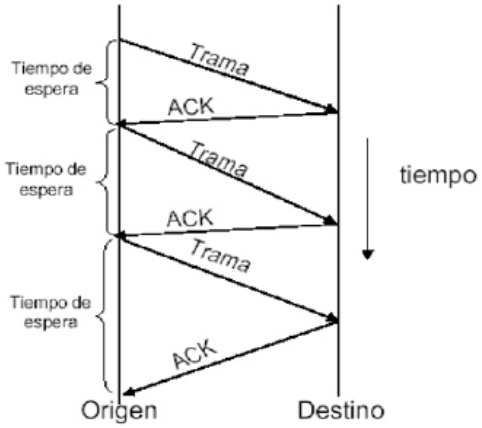


Fig. 139. Control de Flujo. Parada y Espera. Proceso de Señales.

Este mecanismo se basa en que el transmisor (Txor) envía una trama y luego espera a recibir un acuse de recibo antes de enviar la siguiente trama. Es un enfoque simple y efectivo para garantizar que las tramas se entreguen de manera fiable antes de continuar con la siguiente transmisión. Esto significa que el transmisor detiene su proceso de envío y espera confirmación de que la trama anterior se ha recibido con éxito antes de proceder con la siguiente trama. Si no recibe el acuse de recibo dentro de un período de tiempo específico,

puede retransmitir la trama original para garantizar su entrega. Este método, aunque efectivo, no aprovecha al máximo la capacidad del canal de comunicación y puede resultar en una menor eficiencia de transmisión en comparación con otros enfoques más avanzados.

8.19. Protocolo de Ventana Deslizante

Este método de comunicación se desarrolla para evitar que se produzcan largos periodos de inactividad en línea, lo que resulta en una utilización más eficiente del ancho de banda disponible. Sin embargo, para lograr esta eficiencia, el Piggybacking introduce cierta complejidad y requiere espacio adicional de almacenamiento temporal. Para llevar a cabo el Piggybacking, se utiliza un búfer de reproducción de tamaño n, que actúa como un área de almacenamiento intermedio para retener datos antes de ser transmitidos. (Blake, 2006)

La idea central del Piggybacking es combinar múltiples transmisiones de datos en un solo paquete de forma eficiente. Esto significa que, en lugar de enviar datos de manera independiente en tramas separadas, los datos se agrupan y se transmiten juntos cuando se detecta una oportunidad adecuada. Esto puede incluir la combinación de respuestas de acuse de recibo (ACK) con los datos originales para aprovechar al máximo el tiempo de transmisión y reducir los tiempos de inactividad. (Carlson, 2007)

El uso del búfer de reproducción y la técnica de Piggybacking hacen que este enfoque sea más eficiente en términos de ancho de banda, pero también introduce una mayor complejidad en la gestión de datos y puede requerir un almacenamiento temporal adicional para mantener los datos hasta que se optimice su envío en un paquete combinado. (Carlson, 2007)

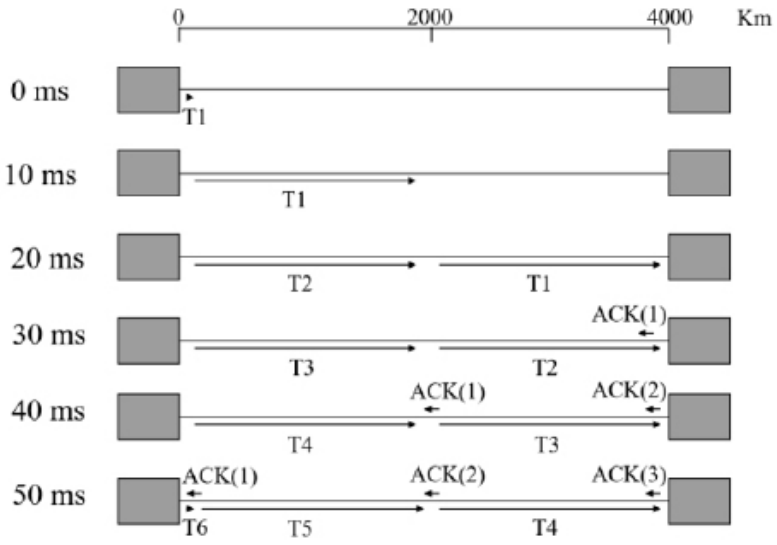


Fig. 140. Proceso de Piggybacking

8.20. Tamaño de la Ventana

Es un valor de referencia para el manejo de los datos. El valor de la mínima ventana para considerar un 100% de ocupación, se tiene en la condición que es la que "llena el hilo" con los datos en ambos sentidos, más uno:

$$W = 2\tau^{*}v/t + 1$$

Donde:

W: tamaño de ventana

τ: tiempo de propagación

v: velocidad de la línea

t: tamaño del frame.

8.21. Protocolos de Ventana Deslizante

Existen dos enfoques comunes en protocolos de control de flujo y control de errores: Retroceso n y Repetición Selectiva. Estos protocolos determinan cómo se manejan las tramas en caso de pérdida o error durante la transmisión. Aunque ambos cumplen con la función de garantizar una comunicación fiable, presentan diferencias significativas en términos de complejidad y eficiencia, que se consideran así:

1. Retroceso n: En este enfoque, el tamaño de la ventana se calcula como el número de secuencia menos uno (Nº secuencia – 1). Esto significa que el receptor esperará recibir secuencialmente las tramas y, si se detecta un error, solicitará la retransmisión de las tramas perdidas o dañadas. Retroceso n es un método más simple, pero puede ser menos eficiente ya que si se pierde una trama, se deben esperar todas las tramas posteriores antes de que se vuelva a transmitir la trama perdida. (Tanenbaum, 2003; Stallings, 2004)

2. Repetición Selectiva: Este enfoque es más complejo, pero también más eficiente. El tamaño de la ventana en Repetición Selectiva se calcula como la mitad del número de secuencia (Nº secuencia/2). En lugar de esperar todas las tramas posteriores en caso de error, el receptor puede aceptar y almacenar tramas posteriores a la trama dañada o perdida. Esto permite una recuperación más rápida y eficiente de las tramas individuales afectadas. Sin embargo, debido a que el receptor debe mantener un búfer para tramas fuera de secuencia, este método requiere más espacio de almacenamiento en el receptor.

La elección entre Retroceso n y Repetición Selectiva depende de las necesidades específicas de la aplicación. Si la eficiencia es crítica y se dispone de suficiente espacio en el búfer del receptor, Repetición Selectiva puede ser preferible. Por otro lado, si se prioriza la simplicidad y se pueden tolerar tiempos de espera más largos, Retroceso n puede ser la elección adecuada. (Tanenbaum, 2003)

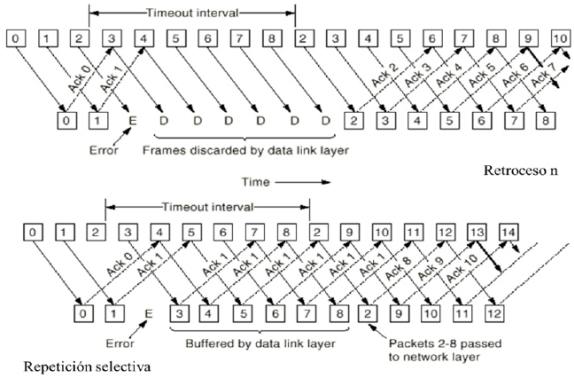


Fig. 141. Protocolos de ventana deslizante

8.22. Control de Flujo, Ventana Deslizante

En este método, el transmisor (Txor) no espera necesariamente un acuse de recibo (ACK) después de enviar cada trama individual. En cambio, envía un conjunto o ventana de tramas antes de esperar los ACK correspondientes.

- La ventana deslizante se utiliza para optimizar la eficiencia de la comunicación y el flujo de datos con las siguientes características:
- El transmisor tiene una ventana de secuencia que consiste en un rango de números de secuencia. Por ejemplo, si la ventana tiene un tamaño de 5, podría incluir números de secuencia del 1 al 5.
- El transmisor puede enviar tramas con cualquier número de secuencia dentro de la ventana sin esperar un ACK inmediato. Esto permite que múltiples tramas se transmitan de manera continua sin demoras entre ellas.
- El receptor (Rxor) recibe las tramas y envía un ACK para cada trama confirmada. El ACK indica que se ha recibido correctamente y se espera la siguiente trama dentro de la ventana.

- Si el transmisor recibe un ACK, sabe que todas las tramas con números de secuencia anteriores a la trama confirmada han sido recibidas y pueden ser retiradas de su ventana de secuencia.
- El transmisor puede seguir enviando nuevas tramas para llenar los espacios vacíos en la ventana de secuencia. Este proceso permite un flujo de datos eficiente y evita largas esperas.

La ventana deslizante es una técnica que optimiza la transmisión continua de datos al permitir que el transmisor envíe múltiples tramas antes de esperar ACKs individuales. Esto mejora la eficiencia de la comunicación y garantiza un flujo constante de datos entre el transmisor y el receptor. (Tomasi, 2003)

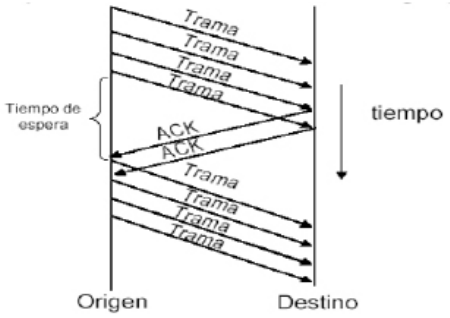


Fig. 142. Control de Flujo. Ventana Deslizante

En esta técnica, el transmisor (Txor) no espera necesariamente un acuse de recibo (ACK) después de enviar cada trama individual. En cambio, envía un conjunto o ventana de tramas antes de esperar los ACK correspondientes.

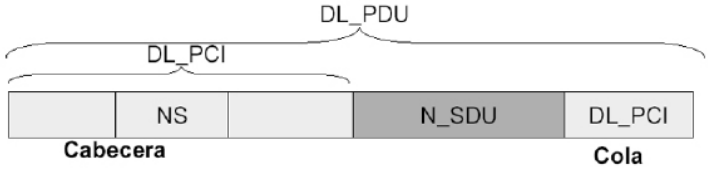


Fig. 143. Control de Flujo. Ventana Deslizante. Manejo de Trama.

Ejemplo de Control de Flujo, Ventana Deslizante:

NS=4 y NS ACK indica el NS de la siguiente trama.

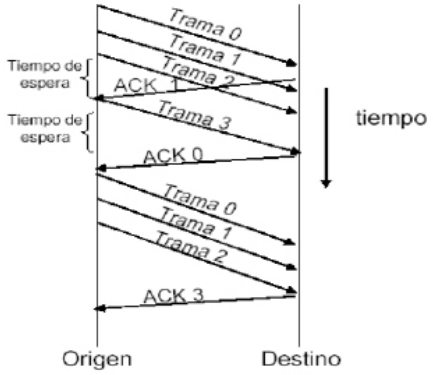


Fig. 144. Control de Flujo. Ventana Deslizante. Proceso

Al principio, la ventana de transmisión Txor tiene un límite máximo de n-1 tramas. A medida que se envían tramas, se disminuye el tamaño de la ventana para las tramas que están esperando recibir un acuse de recibo (ACK). Si el tamaño máximo de la ventana es igual a w, entonces, si se han enviado k tramas desde el último ACK (donde k es menor o igual a w), el número de tramas que quedan en la ventana es w-k. Después de recibir un ACK que confirma la recepción de k tramas, la ventana vuelve a su tamaño completo. (Stremler, 2008)

8.23. Control de Flujo. Ventana Deslizante. Ventana Rxor.

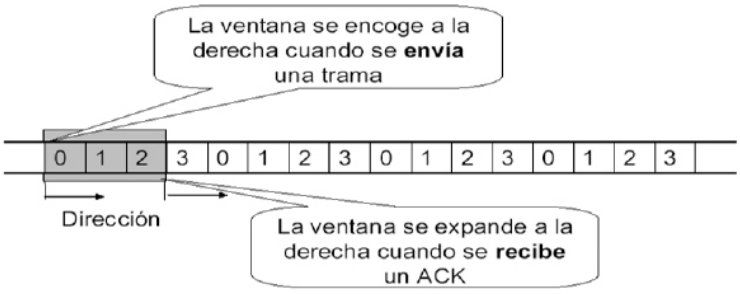


Fig. 145. Control de Flujo. Ventana Deslizante. Ventana Rxor

8.24. Control de Flujo. Ventana Deslizante. Ventana Txor.

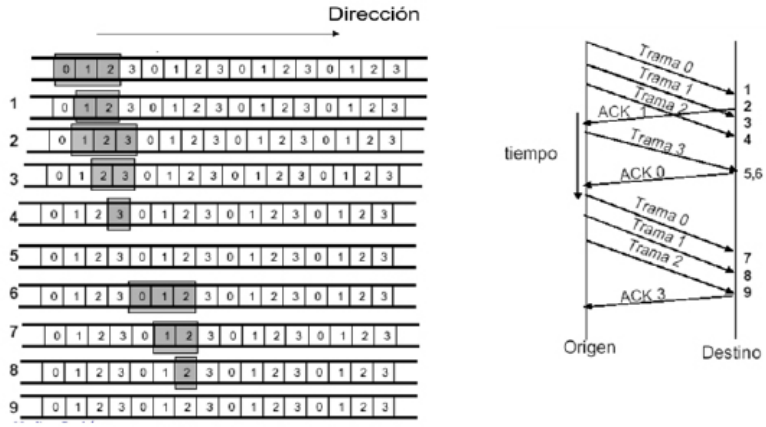


Fig. 146. Control de Flujo. Ventana Deslizante Ventana Txor

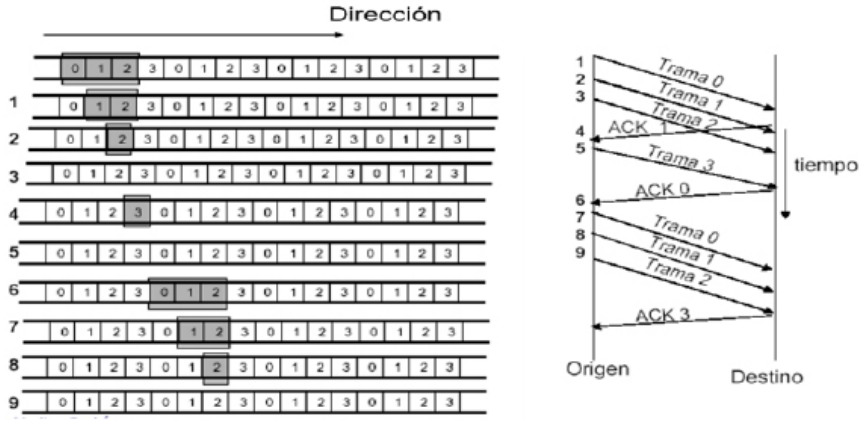


Fig. 147. Control de Flujo. Ventana Deslizante. Ventana Rxor en Respuesta.

Al principio, la ventana de recepción Rxor consta de n-1 espacios disponibles para recibir tramas. Cuando una trama se recibe, el tamaño de la ventana se reduce, limitando la cantidad de tramas que pueden ser recibidas antes de que se envíe un acuse de recibo (ACK). Si el tamaño máximo de la ventana es w, y se reciben k tramas (con k≤w), entonces el número de espacios disponibles en la ventana sin emitir un

ACK es "w-k". Cuando se envía un ACK para confirmar la recepción de k tramas, la ventana vuelve a su tamaño máximo. El número de tramas que están esperando una confirmación se denomina ventana o tamaño de ventana. Para llevar un registro de cuáles tramas se han enviado y cuáles se han recibido, se les asigna un número, que va de 0 a n-1, siendo n-1 el tamaño de la ventana. Este número se gestiona dentro de la red de comunicación de datos y se llama número de secuencia NS. (Medina Delgado et al., 2017)

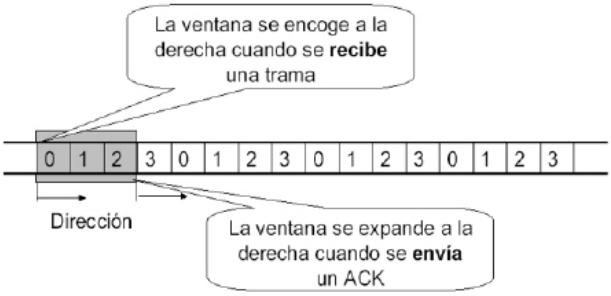


Fig. 148. Control de Flujo. Ventana Deslizante Ventana Txor. Corrimiento de datos.

Dentro del proceso de Control de Flujo, aplicado a través de la Ventana Deslizante, la gestión de la Ventana Rxor se puede abordar de dos maneras principales: asincrónica y sincrónica. Estos enfoques determinan cómo se controla la transmisión y recepción de datos en un sistema de comunicación (Ver Figs. 146 – 148)

La comunicación asincrónica implica que cada byte de información se envía de forma independiente, sin depender de otros bytes en el flujo de datos. En esta configuración, cuando no hay datos disponibles para enviar, la línea de comunicación permanece en un estado de silencio. La ventaja aquí es que se trata de un método flexible y eficiente, ya que no se requiere una estructura rígida de tiempo para la transmisión. Cada byte se envía y recibe individualmente, lo que per-

mite una adaptación fluida a la velocidad de transmisión de los datos. (Danizio, 2020)

Por otro lado, la comunicación síncrona presenta un enfoque diferente. En este caso, no hay separación explícita entre los bytes de datos cuando se envía un mensaje. Los bytes se transmiten en secuencia continua, sin interrupciones o espacios. Esto garantiza que no se pierda la sincronización entre el emisor y el receptor, ya que los datos se transmiten sin pausas o separaciones. La ventaja de este método es su capacidad para mantener una estricta sincronización, lo que lo hace adecuado para aplicaciones donde es crucial mantener una secuencia constante de datos.

Tanto la comunicación asincrónica como la sincrónica en el contexto del Control de Flujo y la Ventana Deslizante ofrecen enfoques válidos para la gestión de datos en sistemas de comunicación. La elección entre estos métodos depende de los requisitos específicos de la aplicación y las necesidades de sincronización. (Danizio, 2019)

8.25. Características de la transmisión asíncrona:

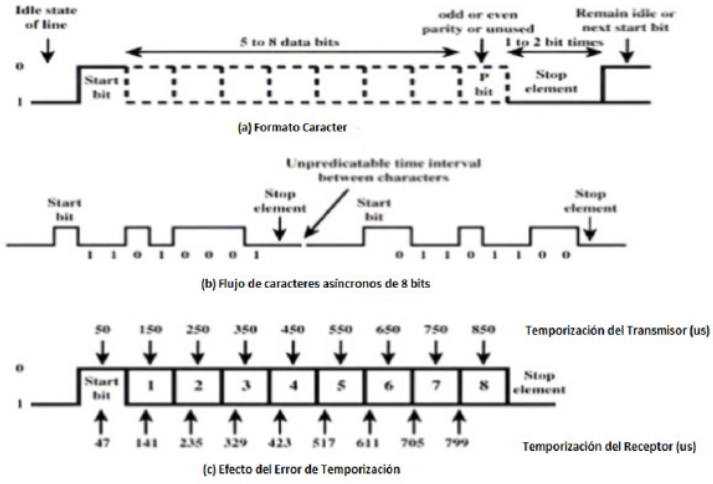


Fig. 149. Características de la transmisión asíncrona

8.26. Tasa de Errores o Bit Error Rate (BER)

La tasa de errores de un medio de transmisión se mide por la BER (Bit Error Rate) que se define como:

BER = bits erróneos / bits transmitidos

Una BER de 10^{-6} significa que hay un bit erróneo por cada millón de bits transmitidos.

8.26.1. Valores de BER habituales.

Medio físico	BER típico
Fibras ópticas	**$< 10^{-12}$**
LANs de cobre, Radioenlaces fijos (microondas)	**$< 10^{-8}$**
Enlaces telefónicos, satélite, ADSL, CATV	**$<10^{-5}$**
GSM	**$>10^{-5}$**

Fig. 150. Valores Típicos de una VER.

Especificación del Tamaño de Ventana:

La ventana mínima para 100% de ocupación es la que 'llena el hilo' de datos en ambos sentidos, más uno:

$$W = 2\tau * v/t + 1$$

Donde

W: tamaño de ventana

τ: tiempo de propagación

v: velocidad de la línea

t: tamaño de trama

$$\text{Ej.}: \tau = 20ms, v = 64\frac{Kb}{s}, t = 640\ bits, W = 5$$

8.27. Ejemplo código Hamming: Emisión

Tamaño palabra de datos: 4 bits (a0a1a2a3)

Número bits paridad/redundancia: 3 (x1x2x3)

Formato palabra codificada a enviar:

Cálculo valores bits de paridad:

$$x1 => x_1\ a_0\ a_1\ a_3$$

$$x2 => x_2\ a_0\ a_2\ a_3$$

$$x3 => x_3\ a_1\ a_2\ a_3$$

8.28. Ejemplo código Hamming: Recepción

Palabra codificada que llega. Es necesario decodificar la palabra. Se tienen que verificar bits paridad c1 c2 y c4. Las fórmulas para verificar los bits de paridad son:

$$e_1 => c_1\ c_3\ c_5\ c_7$$

$$e_2 => c_2\ c_3\ c_6\ c_7$$

$$e_3 => c_4\ c_5\ c_6\ c_7$$

Si se verifica que hubo error:

Si ($e_1 = e_2 = e_3 = 0$) entonces no hubo error en la transmisión, sino error, el bit erróneo corresponde al equivalente decimal de (e3e2e1)2:

001: 1	101: 5
010: 2	110: 6
011: 3	111: 7
100: 4	

Ejercicio 1:

Se ha de transmitir con protocolo HDLC la cadena de bits:

01101111 01111101 1111100

Diga que cadena se transmite realmente. ¿Supone algún problema que la longitud de ésta no sea múltiplo de 8?

Cadena por transmitir:

01101111 01111100 11111010 0

El que no sea múltiplo de 8 no supone problema porque HDLC es un protocolo orientado al bit.

Ejercicio 2:

Enlace E1 (2.048 Kb/s)

F.O. (200.000 Km/s)

HDLC normal =No. Sec. 3 bits (8 valores)

Protocolo retroceso n = ventana tamaño 7

Tramas de 1 Kbyte

Calcular distancia máxima para conseguir 100% de ocupación

Tiempos de generación de tramas y ACKs despreciables

Para 100% ocupación hay que tener tramas para 'llenar el hilo' en ambos sentidos más una. Esto equivale a meter en cada sentido tres tramas (3 + 3 + 1 = 7).

Una trama de 1 KB en una línea E1 tarda:

1.024*8/ 2.048.000 = 0,004 s = 4 ms

Tres tramas 4 x 3 = 12 ms. En ese tiempo la señal recorre:

0,012 s * 200.000 Km/s = 2400 Km

Numseq 8 ventana 7 (retroceso n):

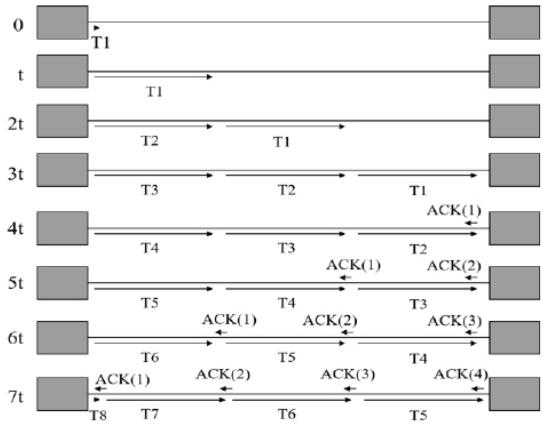


Fig. 151. Numseq 8 ventana 7 (retroceso n).

Ejercicio 3:

Fichero de 1 Mbyte con el carácter decimal 80 (ASCII 'P').

Línea de 64 Kb/s, tramas HDLC, 250 bytes cada una (2000 bits).

Calcular tramas y bits transmitidos y tiempo de transmisión.

Lo mismo para el carácter 231 (decimal)

Lo mismo para código EBCDIC.

Número de Tramas:

1 Mbyte = 1024 * 1024 * 8 = 8.388.608 bits

Tramas: 8388608/2000 = 4194,3 = 4195 tramas

(4194 con 2000 bits y una con 608 bits)

Caracteres:

Decimal 80 = 1010000 (binario)

Secuencia de datos: 01010000010100001010000….

No es preciso el relleno de bits.

Carácter 231 = 11100111

Secuencia de datos: 111001111110011111100111…

Ahora hay que hacer relleno de bits entre caracteres:

111001111111001111110011 1…

Las tramas con 2000 bits (250 bytes) llevarán 249 bits de relleno

La de 608 bits (76 bytes) llevará 75 de relleno.

Bits de relleno: 4194 * 249 + 75 = 1044381

Bits transmitidos: 8556448 + 1044381 = 9600797 bits

Tiempo: 9600797/64000 = 150,01 seg.

El uso de código EBCDIC no cambia en nada el resultado si el valor en binario se mantiene.

CAPÍTULO 9

CÓDIGOS DE REDUNDANCIA CÍCLICA

Cyclic Redundancy CodesResumen

Resumen

El código de bloques es una técnica de corrección de errores utilizada para proteger la integridad de los datos transmitidos o almacenados en sistemas de comunicación y almacenamiento. Estos códigos dividen los datos en bloques de longitud fija y añaden bits redundantes para la detección y corrección de errores. La redundancia se calcula mediante un algoritmo específico que depende de las propiedades matemáticas del código utilizado. El código circular es un tipo especial de código de bloques que tiene propiedades adicionales que lo hacen muy útil para una implementación eficiente. Estos códigos se basan en operaciones polinómicas en las que la suma y la multiplicación se realizan en aritmética de campo de Glois. Un código cíclico se define mediante un polinomio generador especial que define la estructura del código. Los polinomios generadores tienen propiedades únicas que facilitan su aplicación y la detección de errores. La codificación en código cíclico consiste en dividir los datos en bloques y añadir bits redundantes mediante operaciones de división polinómica. Estos bits redundantes se calculan utilizando un polinomio generador y se añaden a los datos originales para generar el código final. El generador polinómico representado por G(p) es una parte importante del código cíclico y define características del código como las funciones de corrección de errores y los bloques. Existen teorías basadas en las propiedades y capacidades de los códigos cíclicos. Genera el componente G(p). Este concepto es fundamental para comprender la estructura y el rendimiento del código. La implementación de codificadores y

decodificadores de códigos cíclicos se realiza mediante hardware especializado que realiza las operaciones matemáticas necesarias para una codificación y decodificación eficientes. Este circuito permite utilizar códigos cíclicos con gran capacidad de corrección de errores en diversas aplicaciones de comunicación y almacenamiento.

Palabras claves: Códigos Cíclicos, Trabajo con Polinomios

Abstract

Block code is an error correction technique used to protect the integrity of data transmitted or stored in communication and storage systems. These codes divide the data into fixed-length blocks and add redundant bits for error detection and correction. Redundancy is calculated using a specific algorithm that depends on the mathematical properties of the code used. Circular code is a special type of block code that has additional properties that make it very useful for efficient implementation. These codes are based on polynomial operations where addition and multiplication are performed in Glois field arithmetic. A cyclic code is defined by a special polynomial generator polynomial that defines the structure of the code. Generator polynomials have unique properties that make them easy to implement and detect errors. Encoding in cyclic code involves dividing the data into blocks and adding redundant bits through polynomial division operations. These redundant bits are computed using a generator polynomial and added to the original data to generate the final code. The polynomial generator represented by G(p) is an important part of cyclic code and defines features of the code such as error-correction functions and blocks. There are theories based on the properties and capabilities of cyclic codes. Generates the G(p) component. This concept is fundamental to understanding code structure and performance. The implementation of bike code encoders and decoders is done by specialized hardware that performs the mathematical operations required for efficient encoding and decoding. This circuit allows the use of cyclic codes with high error correction capabilities in a variety of communication and storage applications.

Keywords: *Cyclic Codes, Working with Polynomials.*

9.1. Breve Introducción a los Códigos de Bloque

Se denominan códigos de bloque porque el proceso de codificación no tiene lugar bit a bit, sino empleando un bloque de bits de mensaje (k bits) a los que se le añadirá un bloque de bits de chequeo (q bits) que seguirán la regla del codificador para conformar un bloque de bits de datos (n bits), que se llama palabra codificada y se dice que pertenece al código. (Stremler, 2008)

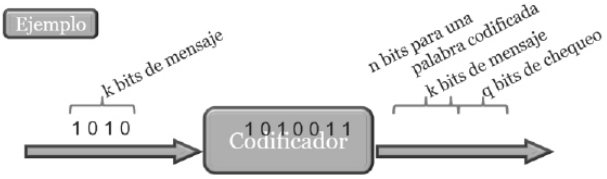


Fig. 152. Códigos de bloque

Códigos Cíclicos como caso particular de los códigos de bloque:

Se denominan "cíclicos" por la particularidad que cumplirán las palabras que pertenezcan al código.

Sea $X = [\, x_{n-1} \;\; x_{n-2} \;\; \ldots \;\; x_1 \;\; x_0 \,]$ una palabra codificada, si el código de bloque empleado ha sido un CRC, entonces se cumplirá que:

$$X' = [\, x_{n-2} \ldots x_1 \;\; x_0 \;\; x_{n-1} \,] \quad y \quad X'' = [\, x_{n-3} \;\; \ldots \;\; x_1 \;\; x_0 \;\; x_{n-1} \;\; x_{n-2} \,]$$

También serán palabras válidas de códigos (Igual que el resto de los vectores obtenidos mediante rotaciones sucesivas de los bits de X).

Debe notarse que la Matriz de Chequeo de Paridad que se empleará para este tipo de codificación necesitará condiciones muy especiales o específicas para que se cumpla esta propiedad.

9.2. Introducción a los Códigos Cíclicos y al Trabajo con Polinomios

Los CRC constituyen un caso particular de código de bloque y a pesar de que su tratamiento pudiera ser matricial, es más usual explicarlos mediante el trabajo con polinomios. (Buehler & Lunden, 1966)

Para cualquier secuencia de bits existirá un polinomio asociado que los represente. Sea una secuencia de n bits:

$$X = [\, x_{n-1} \;\; x_{n-2} \;\; \ldots \;\; x_1 \;\; x_0 \,]$$

Se dice entonces que su polinomio asociado será:

$$X(p) = x_{n-1}.p^{n-1} + x_{n-2}.p^{n-2} + \ldots + x_1.p + x_0$$

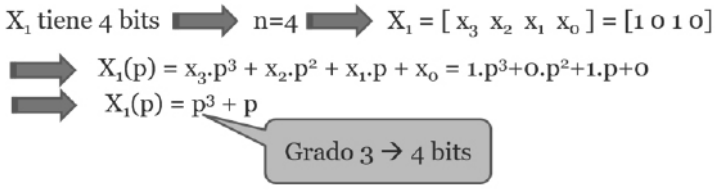
Esta relación es unívoca en ambos sentidos.

9.3. Introducción a los Códigos Cíclicos y al Trabajo con Polinomios

Ejemplo 1:

Obtener el polinomio asociado a la secuencia X1 = [1 0 1 0]

Solución:



9.3.1 Ejemplo 2

Obtener la secuencia asociado al polinomio X2(p)= p7 + 1.

$$x_1(p) = 1.p^7 + 0.p^6 + \ldots + 0.p + 1$$

$$x_1 = [x_7 \; x_6 \ldots x_1 \; x_0] = [10000001]$$

Ejemplo 3:

Probar que G = [1011] divide a X=[10000001].

Sean dos secuencias de bits X y G cuyos polinomios asociados son X(p) y G(p). Se dice que G divide exactamente (o sencillamente divide) a X, si al efectuar la división de X(p) entre G(p) no deja residuo (o resto).

Solución:

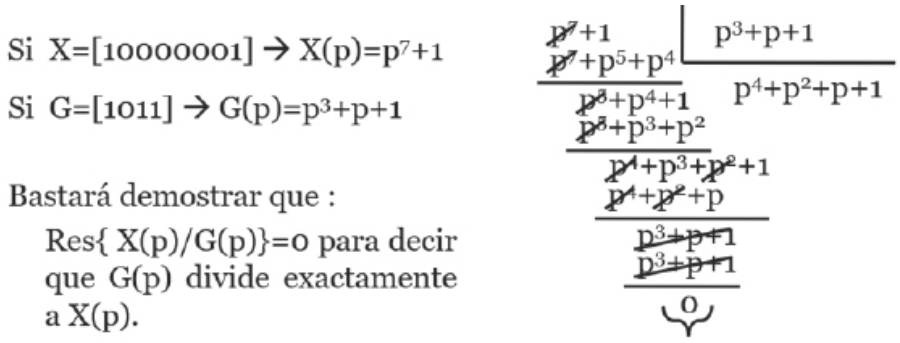


Fig. 153. Solución ejemplo 1

9.4. Polinomios Generadores

Debido a que los CRC serán explicados mediante el trabajo con polinomios, en lugar de matrices generadoras se emplearán polinomios generadores. Estos son los que necesitarán condiciones muy especiales o específicas.

Para que un polinomio pueda ser capaz de generar un CRC deberá cumplir que:

1. El grado del polinomio generador es igual al número de bits de chequeo empleado en la codificación (q bits).
2. El polinomio siempre termina en uno.
3. El polinomio debe ser primitivo.

Las dos primeras condiciones implican que el polinomio generador sea de la forma $G(p)=p^q+ \ldots + 1$. Para la tercera condición se requiere definir cuándo un polinomio será primitivo.

Definición: Se dice que un polinomio G(p) de grado q es primitivo cuando es capaz de dividir exactamente a un polinomio de la forma p^n+1 (*con* $n=2^q-1$) y no a ninguno escrito de esa forma de orden inferior.

Polinomios Generadores:

Ejemplo 2:

Probar que G = [1011] es un polinomio primitivo.

Solución:

Si G es una secuencia de 4 bits entonces su grado es $q=3$, por tanto, para que sea primitivo deberá ser capaz de dividir al polinomio p^7+1 (de la definición, p^n+1 *con* $n=2^q-1$) y no deberá dividir a p^6+1, p^5+1, p^4+1, p^3+1, p^2+1, $p+1$.

Que divide exactamente al polinomio p^7+1 ya se comprobó en el ejemplo anterior. Bastará demostrar que no divide a p^6+1, p^5+1, p^4+1, p^3+1, p^2+1, $p+1$.

Polinomios Generadores:

Estas operaciones se realizarán pues en este caso no tomarán demasiado tiempo. En el caso en que q aumente deberá implementarse un procedimiento que lo simplifique.

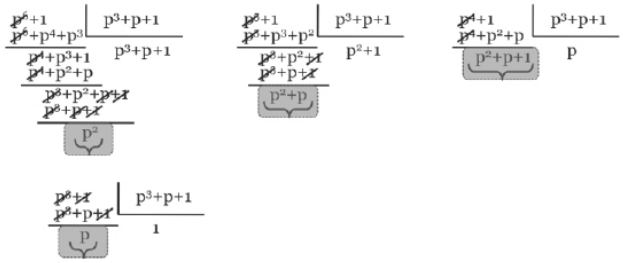


Fig. 154. Solución ejemplo 2

Todos dejan Residuo, por lo que queda demostrado que p3+p+1 es un polinomio primitivo y puede ser empleado para un CRC que emplee 3 bits de chequeo.

9.5. Codificación

La codificación en los CRC tiene lugar procurando que todas las palabras que serán transmitidas sean exactamente divisibles por el polinomio que las genera. Por tanto, deberá cumplirse que:

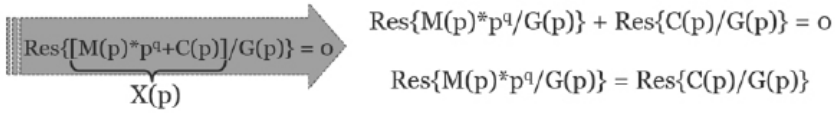
$$Res\{X(p)/G(p)\} = 0$$

Donde:

X(p): polinomio asociado a una palabra que pertenece al código.

G(p): polinomio generador del código.

Pero además deberá cumplirse que X(p) es de la forma M(p)*pq + C(p) para que las palabras codificadas contengan un el bloque de bits de mensaje seguido de los q bits de chequeo. Por tanto, también se cumplirá que:



Codificación:

Esta será la expresión más importante en la codificación y dice como proceder para codificar.

Significa que: Los bits de chequeo se obtienen calculando el residuo de la división del polinomio de bits de mensaje con q ceros detrás entre el polinomio generador.

A continuación, se ve el siguiente ejemplo:

$$Res\{M(p)*p^q/G(p)\} = Res\{C(p)/G(p)\}$$

9.5.1 Ejemplo 3

Codificar empleando un CRC (7,4) la secuencia de bits de mensaje:

1001 1010

Solución:

$$n=7 \quad k=4 \quad q=n-k=3$$

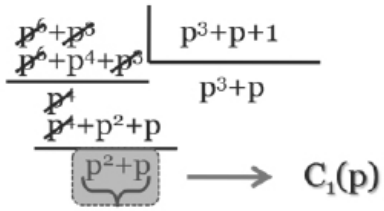
Para q=3 se puede usar el polinomio primitivo G(p)= p3+p2+1.

Primer bloque de bits de mensaje:

$$1001 \;\grave{a}\; M_1(p) = p^3+1$$

$$M_1(p)*pq \;\grave{a}\; (p^3+1)(p^3)=p^6+p^3$$

$$C_1(p)=Res\{[p^6+p^3]/[p^3+p+1]\}$$



$$X_1(p)=M_1(p)*p^q+C_1(p)$$

$$X_1(p) \rightarrow p^6+p^3+p^2+p$$

$$X_1 \rightarrow [1001\ 110]$$

Fig. 155. Solución ejemplo 3

Ejemplo 4 Codificación

Codificar empleando un CRC (7,4) la secuencia de bits de mensaje:

1001 1010

Solución:

De manera similar se procede con el segundo bloque de bits de mensaje 1010

$$M2(p)*pc \quad \square\ (p3+p)\ (p3) = p6+ p4$$

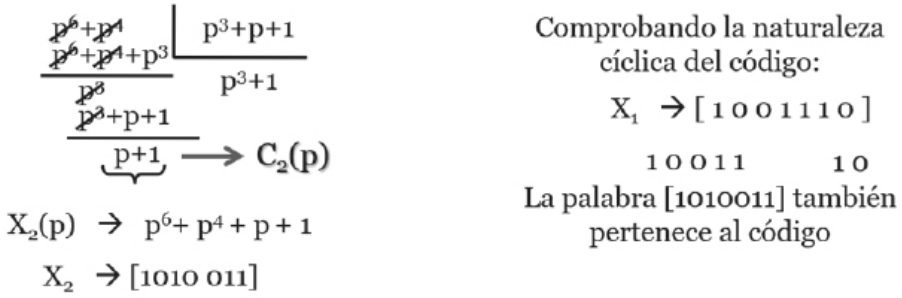


Fig. 156. Solución ejemplo 4

Decodificación: La decodificación en los CRC se realiza dividiendo la palabra recibida (X(p)) entre el polinomio generador (G(p)).

1. Se recibe la palabra.
2. Se calcula el residuo C(p).
3. Si C(p)=0à No se detectan errores.

Si C(p) ≠0 La palabra recibida tiene errores detectables. El residuo es distintivo de la posición del error.

9.6. Propiedades de G(p).

1. G(p) no puede tener a p como factor común. ¿Por qué?
2. De ser así todas las palabras de código terminarían en uno y ese bit no tendría valor.

9.7. Teoremas de G(p).

Cualquier G(p) con más de un término detecta cualquier error simple.

1. Un error simple se representaría por 1 o por pi que evidentemente no es divisible entre cualquier polinomio de más de un término.

2. No existe polinomio con un número impar de términos que sea divisible entre (p + 1).

   Por lo tanto, con un G(p) que tenga a (p + 1) como factor común se pueden detectar la ocurrencia de cualquier combinación de errores impares.

3. Cualquier código cíclico generado por un polinomio de grado b, es capaz de detectar todas las ráfagas de longitud b o menor. L £ q.

   Una ráfaga de largo q se representaría por

   E(p) = pi (pq-1 + pq-2+ ...+1)

   G(p) no tiene a p como factor común y además el segundo término no es de grado q-1, no divisible entre G(p).

4. Se dice que un polinomio G(p) pertenece un exponente “e”, si “e” es el menor entero positivo para el cual (pe + 1) es divisible por G(p).

Ahora, un código cíclico generado por G(p) es capaz de detectar errores simples y dobles si la longitud n de las palabras codificadas es igual o menor que el exponente e al cual pertenece G(p), es decir, si n £ e.

9.7.1 Ejemplos de P(x) usados

CRC- 12 = $x^{12} + x^{11} + x^5 + x^2 + x + 1$

CRC- 16 = $x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$

CRC- 32 = $x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$

(Utilizado en IEEE 802)

9.8. Implementación de Codificadores y Decodificadores de Códigos Cíclicos por HW

Cálculo del Residuo en las salidas de los registros:

Las conexiones gi existen si el coeficiente correspondiente en P(x) es 1 y no existen si es cero.

Con la entrada del último dígito de la secuencia F(x) se obtiene los dígitos de R(x) en las salidas de los registros, siendo el de mayor grado el que se encuentra en el último registro y el término independiente a la salida del primer registro. (Enrique, 2004)

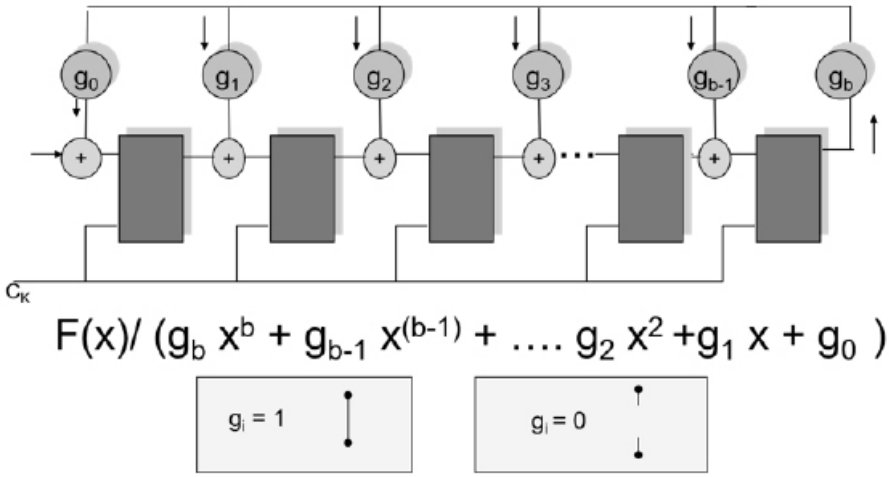


Fig. 157. Codificadores y decodificadores de Códigos Cíclicos por HW

Residuo de F(x) / (x3 + x + 1) a lo sumo de grado 2, (3 dígitos): Ejemplo de la situación de los registros en el proceso de división expresada con la entrada del último 1 de la secuencia F(x) al dividir entre el P(x)= $x^3 + x + 1$.

Compruebe paso a paso que el resultado final es el indicado en la figura.

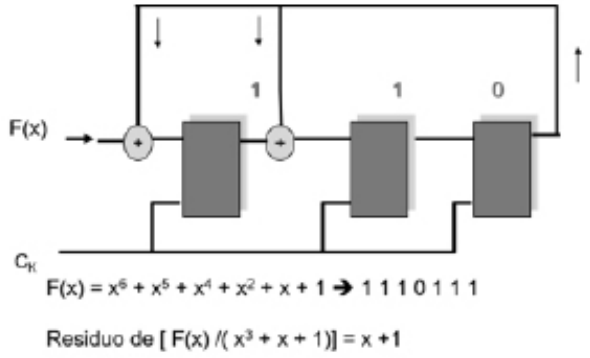
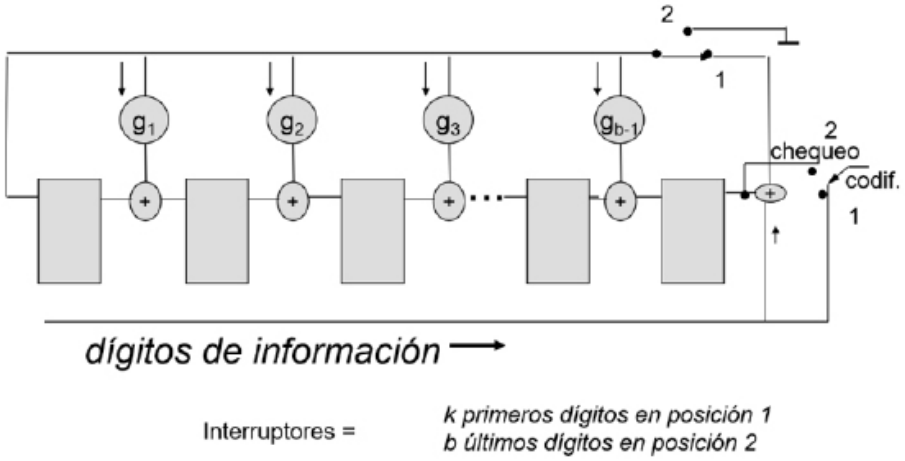


Fig. 158. Proceso de división expresada con la entrada del último 1 de la secuencia F(x)

Circuitos codificadores: Este es el diagrama general de un codificador cíclico cuyo $P(x) = x^b + g_{b-1}\, x^{b-1} + \ldots . g_1 x + 1$.

Para los primeros k pulsos de reloj los interruptores están en la posición 1 y en los b restantes pulsos de reloj en la posición 2.

La secuencia codificada sale por el terminal del interruptor de la extrema derecha y queda completamente construido tras n pulsos de reloj. (Proakis & Salehi, 2002)



Circuito codificador para $P(x) = x3 + x + 1$:

Compruebe la operación siguiendo la secuencia de dígitos de información 1001.

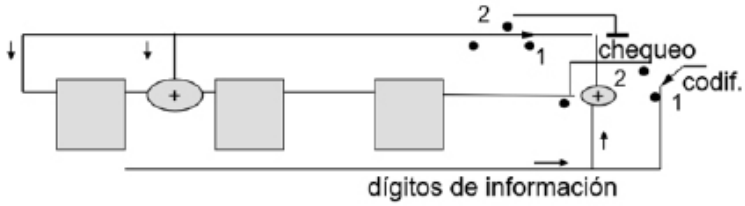


Fig. 160. Circuito codificador para $P(x) = x3 + x + 1$

Conclusiones

1. Se caracterizan por un G(p) de grado q.
2. Pueden detectar y/o corregir errores.
3. Muy utilizados por dos factores:
4. Su eficiencia en la detección de ráfagas de errores.
5. Su fácil implementación por HW (con XOR y Registros de desplazamientos) y por software.

CAPÍTULO 10

TÉCNICAS DE CONTROL DE ERRORES

Cyclic Redundancy CodesResumen

Resumen

Las técnicas de control de errores son esenciales en las comunicaciones para asegurar que los datos transmitidos lleguen de manera precisa y confiable al receptor. La elección de la técnica adecuada depende de la necesidad de detección y corrección de errores. Una estrategia común es el uso del protocolo de Retransmisión Automática (ARQ), que permite la detección y corrección de errores mediante la retransmisión selectiva de bloques de datos dañados. Entre las variantes de ARQ se encuentran el ARQ Parada y Espera, donde el receptor solicita la retransmisión de bloques con errores antes de recibir nuevos datos, y el ARQ de Transmisión Continua, que permite la transmisión continua de datos sin esperar confirmaciones. El Procedimiento de Ventana Deslizante es otra técnica de ARQ que permite transmitir N bloques de datos antes de recibir confirmaciones, mejorando la eficiencia y el rendimiento del sistema. Estas técnicas de control de errores son fundamentales para garantizar la integridad y fiabilidad de las transmisiones en entornos de comunicación. La tecnología ha continuado avanzando en el campo de las comunicaciones y el almacenamiento, dando lugar a nuevos códigos de corrección de errores y mejorando los ya existentes. Entre ellos, se destaca el Código Golay, que sigue siendo relevante y se ha implementado en sistemas de comunicación de alta velocidad, como redes 5G y sistemas de transmisión satelital, debido a su eficiente capacidad de corrección de errores. Los Códigos BCH también han experimentado mejoras y adaptaciones a las nuevas tecnologías. En aplicaciones de almacena-

miento de datos, como unidades de estado sólido (SSD) y sistemas de almacenamiento en la nube, los códigos BCH se utilizan para asegurar la integridad de los datos y protegerlos de posibles errores de lectura y escritura. El Código Reed-Solomon (RS) ha seguido siendo una opción preferida en tecnologías de entretenimiento, como Blu-ray y streaming de video en alta definición. Su capacidad para detectar y corregir errores ha sido crucial para garantizar una experiencia de visualización sin interrupciones.

A medida que avanza la tecnología, también han surgido nuevos códigos de corrección de errores, como los códigos Low-Density Parity-Check (LDPC) y los códigos Turbo, que han encontrado aplicaciones en sistemas de comunicación inalámbrica y transmisiones de alta velocidad.

Palabras clave: ARQ, Código Golay, Códigos BCH, LDPC.

Abstract

Error control techniques are vital in communications to ensure that transmitted data reaches the receiver accurately and reliably. The choice of the appropriate technique depends on the need for error detection and correction. A common strategy is the use of Automatic Repeat Request (ARQ) protocols, allowing for error detection and correction through selective retransmission of damaged data blocks. Variants of ARQ include Stop-and-Wait ARQ, where the receiver requests the retransmission of blocks with errors before receiving new data, and Continuous ARQ, which permits continuous data transmission without waiting for acknowledgments. The Sliding Window Procedure is another ARQ technique that allows transmitting N data blocks before receiving acknowledgments, improving system efficiency and performance. These error control techniques are fundamental to ensuring the integrity and reliability of transmissions in communication environments. Technology has continued to advance in the field of communications and storage, giving rise

to new error correction codes and enhancing the existing ones. Among them, the Golay Code stands out, remaining relevant and being implemented in high-speed communication systems, such as 5G networks and satellite transmission systems, due to its efficient error correction capability. BCH Codes have also undergone improvements and adaptations to new technologies. In data storage applications, such as Solid-State Drives (SSD) and cloud storage systems, BCH codes are used to ensure data integrity and protect against potential read and write errors.

The Reed-Solomon (RS) Code has remained a preferred choice in entertainment technologies, such as Blu-ray and high-definition video streaming. Its ability to detect and correct errors has been crucial in ensuring a seamless viewing experience.

As technology advances, new error correction codes have also emerged, such as Low-Density Parity-Check (LDPC) codes and Turbo codes, which have found applications in wireless communication systems and high-speed transmissions.

In summary, technology in 2023 has driven the development and adoption of various error correction codes, ensuring higher reliability in communications and data storage across various existing technological applications and platforms.

Keywords: ARQ, Golay Code, BCH Codes, LDPC.

10.1. Técnicas de Control de Errores

Hasta el momento, se ha explorado en profundidad los conceptos de códigos utilizados tanto para detectar como para corregir errores en sistemas de comunicación. Sin embargo, la detección de errores por sí sola no es suficiente; es esencial contar con procedimientos que permitan corregir los errores detectados. Si bien en los códigos correctores de errores, este proceso de corrección es intrínseco, en los códigos de detección, se requiere un enfoque adicional para abordar la corrección.

El campo de las técnicas de control de errores se centra en el desarrollo de procedimientos y estrategias para la recuperación efectiva de errores en la transmisión de datos. Estas técnicas pueden clasificarse en dos categorías principales:

- Detección y Retransmisión Automática (ARQ): En el enfoque de Detección y Retransmisión Automática, representado por el acrónimo ARQ (Automatic Request), los errores se identifican mediante mecanismos de detección. Cuando se detecta un error en la transmisión, se solicita la retransmisión del bloque de datos afectado. Este proceso se basa en la detección de errores y la subsiguiente corrección a través de la retransmisión de datos.
- Técnica de Corrección (FEC): La Técnica de Corrección, representada por el acrónimo FEC (Forward Error Correction), se enfoca en corregir los errores directamente sin necesidad de retransmitir datos. Esta corrección se logra a través de la aplicación de códigos correctores de errores que se incorporan en la trama de datos. Estos códigos se diseñan de manera que permiten la recuperación de errores sin requerir la retransmisión de la información.

Ambos enfoques tienen sus propias ventajas y desafíos, y la elección entre ellos depende de los requisitos específicos de una aplicación dada. En resumen, el control de errores es una parte fundamental de la comunicación de datos, y estas dos categorías principales, ARQ y FEC, ofrecen soluciones para garantizar una transmisión confiable y precisa de la información en diversas situaciones. (Carlson, 2007)

10.2. Método seleccionado

Este dependerá de:

Las características de la aplicación seguridad requerida, demoras permitidas etc.

Las características del soporte de comunicación y del enlace tiempos de propagación, simplex, semiduplex, duplex, etc.

10.3. Tipos de Detección y Retransmisión Automática (ARQ).

Entre los tipos que se tiene se considera a:

- **Parada y Espera:** Los bloques de información (generalmente tramas) son transmitidos uno a uno y no se transmite el siguiente hasta no haber recibido la confirmación positiva del anterior. Por eso Transmite y Espera confirmación.
- **Transmisión Continua:** Se pueden transmitir bloques consecutivos sin que haya que esperar las confirmaciones una a una. Hay diferentes tipos y con parámetros que determinan sus procedimientos. Entre lo cual se tiene:
    a. Ir N bloques atrás
    b. Retransmisión selectiva

10.3.1. ARQ Parada y Espera

Emplean códigos detectores de errores para cada bloque. Los bloques (tramas) no requieren ser numerados. Emplean mensajes de confirmación positiva, ACK y de confirmación negativa, NAK. Tras el envío de cada bloque se espera por una confirmación, si es positiva se pasa a la transmisión de la siguiente trama; si es negativa se repite la trama anterior. Entre sus características se cuenta que las tramas no precisan campos de numeración. (Tomasi, 2003)

No se enviará una trama hasta que la anterior no haya sido debidamente confirmada.

La comunicación basta que sea semiduplex

No hay transmisión simultánea.*

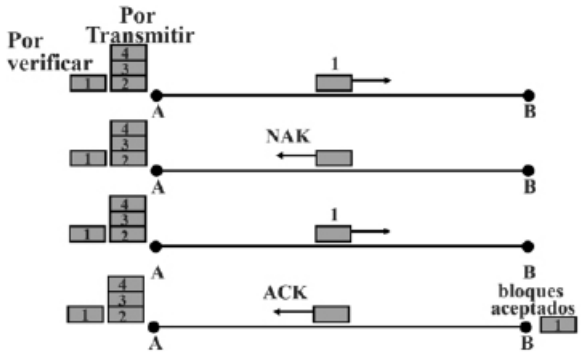


Fig. 161. ARQ: Parada y Espera

Es preciso implementar cosas adicionales:

¿Qué pasa si se envía un bloque y no llega confirmación?

Preciso implementar un temporizador que al expirar se retransmita la trama.

¿Y si se retransmite varias veces y no llega confirmación?

Necesario implementar un contador de retransmisiones al llegar a un máximo aborte la comunicación.

¿Qué sucede si un ACK se pierde?

Se retransmite la trama, el receptor la toma como nueva y ésta se duplica en el receptor.

Tener dos ACKs que se alternen, ACK0 y ACK1 o destinar 1 bit del encabezamiento a distinguir entre tramas consecutivas, “1” o “0”.

10.3.2. Eficiencia de Método Parada y Espera en el Uso del Mediode Transmisión

Como es de suponer la eficiencia del uso del medio de transmisión se ve afectada por este procedimiento que es en general el más lento de todas las modalidades.

Cálculo de la Eficiencia del uso del medio de transmisión:

t0, instante en que se inicia la transmisión de una trama.

t0 + tp, instante en que el frente de la trama llega al punto de recepción. (tp: tiempo de propagación en el enlace)

t0 + Tt, instante en que termina de emitirse la trama en el transmisor.

t0 + Tt + tp, instante en que se concluye la recepción de la trama

t0 + Tt + 2tp, instante en que llega el ACK al transmisor, se desprecia el tiempo de procesamiento de la trama por el receptor y el tiempo de duración del ACK que son pequeños.

Mientras mayor es a =tp/Tt (Mayor es tp en comparación con el tiempo de la trama Tt), menor es la eficiencia.

Las peores condiciones ocurren cuando el tiempo de la trama es pequeño en comparación con el tiempo de propagación (a>1).

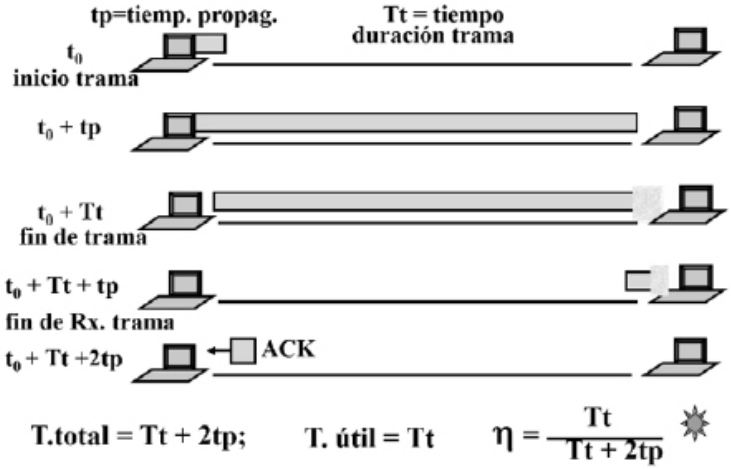


Fig. 162. Cálculo de la Eficiencia del uso del medio de transmisión

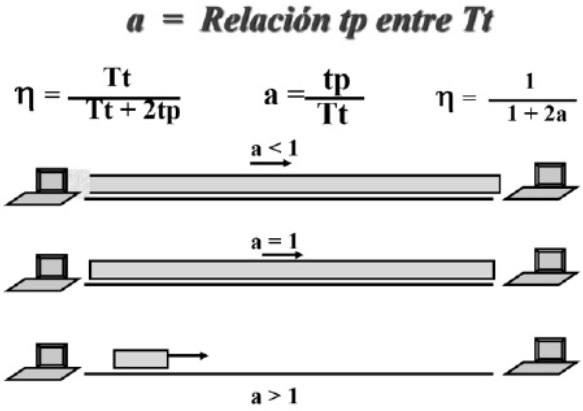


Fig. 163. Relación tp/Tt

10.3.3. Eficiencia de Parada y Espera

$$n = \frac{T_t}{T_t + 2tp} = \frac{1}{1 + 2\left(\frac{tp}{T_t}\right)}$$

$$a = \frac{tp}{T_t} \qquad ; \qquad n = \frac{1}{1 + 2a}$$

$$tp = \frac{dist}{velc.propo} = \frac{d}{v}$$

$$T_t = Long.\frac{trama}{Veloc.deinf\ en\ bps} = \frac{L}{B}$$

10.3.4. ARQ Parada y Espera Conclusiones.

1. Emplea códigos detectores.
2. Es de muy simple implementación.

3. No requiere campo de numeración de trama.
4. Basta que el circuito sea semiduplex.

   a < 1; eficiencia aceptable; cortas distancias; tramas largas; SI puede emplearse Parada y Espera

   a > 1; Muy baja eficiencia; largas distancias; tramas cortas, NO debe emplearse Parada y espera. En comunicaciones vía satélites no puede emplearse Parada y Espera.

5. Emplea códigos detectores.
6. Es de muy simple implementación.
7. No requiere campo de numeración de trama.
8. Basta que el circuito sea semiduplex.
9. Aplicables cuando el tiempo de duración de las tramas es mayor o del orden del tiempo de propagación entre los extremos.

En comunicaciones vía satélites no puede emplearse Parada y Espera.

10.3.5. ARQ de Transmisión Continua.

Se caracteriza por la transmisión de tramas consecutivas eliminando o disminuyendo las paradas en espera de confirmaciones.

Se define por el protocolo la cantidad máxima de tramas que pueden ser enviadas sin recibir confirmación (ancho de la ventana de transmisión).

Es preciso numerar las tramas, destinando para ello un campo en el encabezamiento de esta.

No es obligatorio dar asentimientos trama a trama.

La confirmación positiva o negativa de la trama “n” implica también la confirmación positiva de todas las anteriores. *

10.4. Transmisión Continua, N bloques atrás

Al detectarse error en la trama 3 se envía un NAK (confirmación negativa) de esta trama y el receptor no acepta otra trama que no sea a partir de la 3, por lo que el transmisor debe repetir los bloques o tramas a partir de la 3.

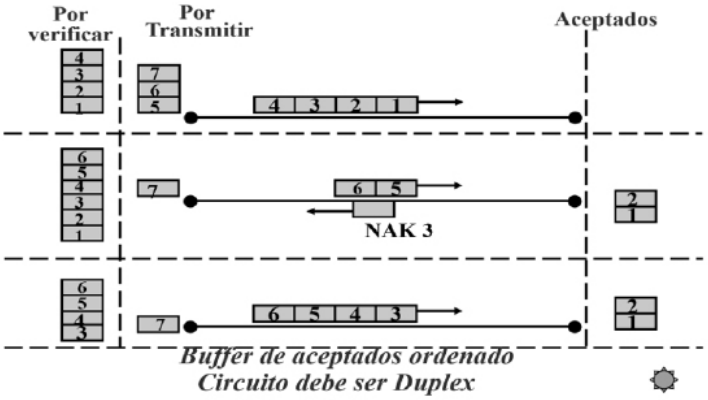


Fig. 164. Buffer de Aceptados ordenado

10.4.1. Transmisión Continua, N bloques Atrás

Las tramas se transmiten de forma continua dentro de la ventana de transmisión. Las confirmaciones no se dan trama a trama. Recibir el ACK de la trama "N" puede significar la confirmación positiva de la trama "N" y de las anteriores. Al recibir una trama con error el receptor descarta las tramas siguientes y emite un NAK "N". Recibir el NAK de la trama "N" equivale a confirmar positivamente las tramas anteriores y hacer repetir las transmisiones de las tramas a partir de la rechazada. Las tramas quedan ordenadas en el buffer de recepción. Pérdida de eficiencia por descartar tramas que pudieran haber llegado correctamente. (Buehler & Lunden, 1966)

10.4.2. Transmisión Continua, Retransmisión Selectiva

Ante un NAK, sólo se retransmite la trama con error. Alcanza mayor eficiencia en el uso del medio de transmisión.

10.5. Transmisión Continua, Retransmisión Selectiva

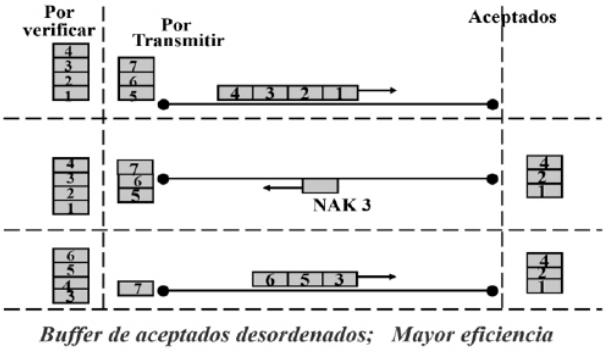


Fig. 165. Buffer de Aceptados ordenado

Eficiencia vs "a" para diferentes valores de W en retransmisión selectiva

Aprecie que considerar W, ventana de transmisión =1, equivale a que se esté en parada y espera. A medida que el tamaño de la ventana de transmisión crece (a partir de determinado valor de a) la eficiencia crece. (Cook, 1967)

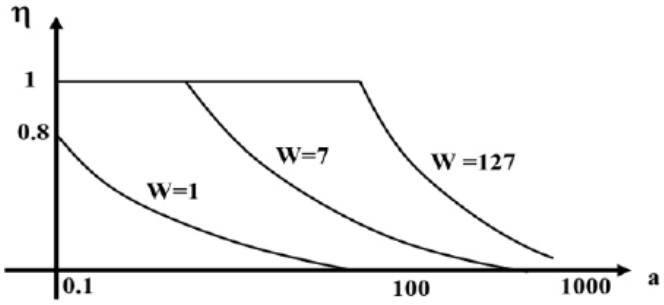


Fig. 166. Eficiencia vs "a" para diferentes valores de W en retransmisión selectiva

10.5.1. Transmisión continua.

Requiere de circuitos duplex que son empleados para mantener transferencia de información en ambos sentidos.

Las confirmaciones constituyen un campo de la trama de información de sentido opuesto. (piggybacking). Es decir, cada trama puede enviar información en un sentido y confirmaciones en sentido contrario.

Procedimiento de Ventana Deslizante: Como parte del protocolo se define el tamaño de la ventana deslizante "W".

W = Número de tramas que se pueden enviar de forma continua sin recibir confirmación alguna.

Recibir un ACK hace que la ventana se deslice W posiciones a partir de la trama confirmada.

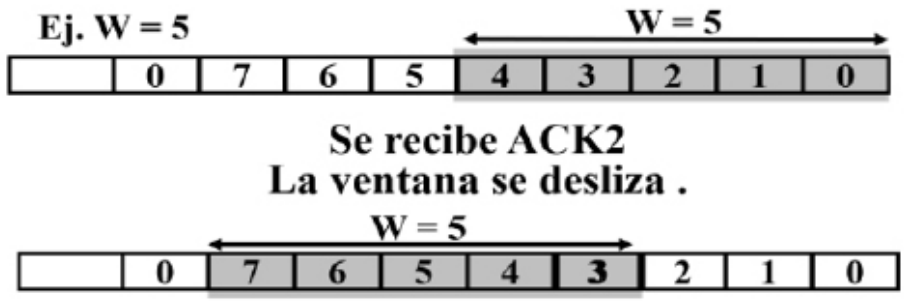


Fig. 167. Se recibe ACK2

10.5.2. Procedimiento de Ventana Deslizante

El tamaño de la ventana influye en la eficiencia del uso del medio. Además de establecer el procedimiento para el control de errores permite ejercer control de flujo, que ejecuta acciones (confirmaciones) en función de las capacidades disponibles en la memoria intermedia, aprecie que no enviar confirmación determina que el flujo en sentido

contrario se detenga al agotarse la W. (Tanenbaum, 2003; Stallings, 2004)

10.6 Otros Códigos para Diseño Protocolar

10.6.1. Conclusión Códigos Cíclicos

1. Se caracterizan por un P(x) de grado b.
2. Pueden detectar y/o corregir errores.
3. Muy utilizados por dos factores:
4. Su eficiencia en la detección de ráfagas de errores.
5. Su fácil implementación por HW con compuertas tipo XOR y Registros de desplazamientos.

10.6.2. Otros Códigos: Código Golay (1).

Código binario (23,12) * con *dmin*=7 Por lo que es capaz de corregir errores triples y detectar hasta 6 errores en las palabras códigos.

$$^{*}(n,k) \quad n=k+b$$

10.6.3. Otros Códigos: Código Golay extendido (2).

Código binario (24,12) con dmin=8 Por lo que es capaz de corregir errores triples y detectar hasta 7 errores en las palabras códigos.

10.6.4. Otros Códigos: Códigos Bose-Chadhuri-Hocquenghem (BCH) (3)

Clase de códigos cíclicos capaces de corregir múltiples errores. Están caracterizados por:

$$2b = n + 1$$

$$n - k = b$$

$$b >= 3$$

$$distancia\ mínima = 2t + 1$$

Ejemplos de códigos BCH:

(15,7) *dmim*=5

(127, 64) Capaz de corregir 10 errores

(127, 36) Capaz de corregir 15 errores.

10.6.5. Otros Códigos: Código Reed-Solomon (RS) (4)

Es una subclase de códigos BCH no binarios. Opera con símbolos de "b" bits cada uno en lugar de bits individuales. Muy útil y empleado para la corrección de errores múltiples. De vital importancia en aplicaciones de actualidad. (Aplicaciones de Comunicaciones inalámbricas entre otras).

10.6.3. Otro Recurso

Se aplican entrelazados para incrementar efectividad ante ruido impulsivo y desvanecimientos. Se combinan más de un código por etapas.

Resumen

La recuperación de errores de transmisión requiere:

1. Empleo de un código detector o corrector de errores.
2. Empleo de una técnica de control de errores.

Técnicas de control de errores:

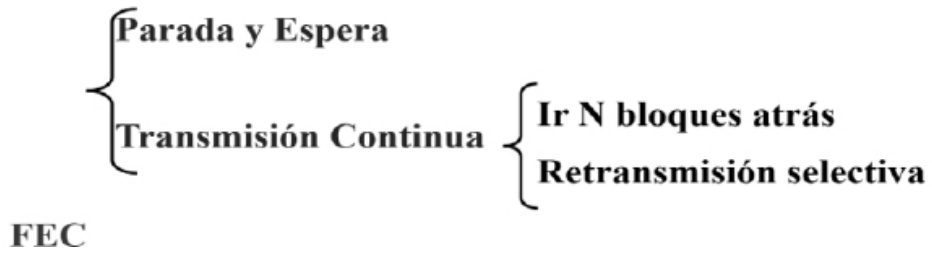


Fig. 168. Resumen de Procedimientos de manejo de Ventanas.

La técnica de parada y espera es sencilla pero ineficiente y sólo requiere de un circuito semiduplex.

La técnica de transmisión continua incrementa la eficiencia al disminuir los tiempos de parada en espera de confirmaciones. Requiere de un circuito full duplex.

Este método permite transmisión de datos en ambos sentidos y se establece un campo de confirmaciones en las tramas que operan bajo el principio de ventana deslizante ejerciéndose de esta forma también control de flujo. (Sundberg, 1986)

Conclusiones

La codificación de canal juega un papel importantísimo en la Transmisión de Datos.

El método empleado depende de las condiciones de la comunicación y de la aplicación en particular.

Los códigos cíclicos son muy empleados por su fácil implementación y su especial eficiencia en la detección de ráfagas de errores. (Zhong, 2022)

CAPÍTULO 11

TEORÍA DE LA INFORMACIÓN

Information Theory

Resumen

La teoría de la información es una rama de las matemáticas aplicadas y la informática que se centra en la cuantificación y transmisión eficaz de la información. Varios factores pueden afectar a la calidad de la señal durante la transmisión de datos, entre ellos perturbaciones como la atenuación, la distorsión por retardo y el ruido. El ruido es uno de los factores más importantes y su presencia puede afectar negativamente a las señales digitales causando errores y dificultando la interpretación precisa de los datos. Para evaluar el ancho de banda del canal y la calidad de la transmisión se tienen en cuenta conceptos como el ancho de banda de la velocidad de transmisión de datos y la relación señal/ruido (relación Eb/N0). El ancho de banda de Nyquist y la capacidad de Shannon son conceptos importantes en la teoría de la información. El primero determina la velocidad máxima de transmisión sin interferencias, mientras que la capacidad de Shannon determina la velocidad máxima teórica de datos que un canal puede transmitir sin pérdida de información. Desde el punto de vista de la codificación de fuentes, esta técnica presenta la información en un formato más compacto para una transmisión o almacenamiento eficaces. Los términos del código y el modo prefijo son aspectos importantes del diseño del código que garantizan una descodificación adecuada. La compresión de señales es una aplicación del código fuente en la que se utilizan técnicas de compresión como el escalado y la codificación para reducir el tamaño de los datos sin perder información importante. Esta compresión se utiliza mucho en el tratamiento de

imágenes y la transmisión de datos para ahorrar ancho de banda y almacenamiento. La teoría de la información y la codificación son fundamentales para garantizar una transmisión de datos eficaz y fiable en los sistemas de comunicación y proporcionan técnicas para mejorar la calidad de la señal, la eficacia del canal y la eficiencia del ancho de banda.

Palabras clave: banda de Nyquist, capacidad de Shannon.

Abstract

Information theory is a branch of applied mathematics and computer science that focuses on the quantification and efficient transmission of information. Various factors can affect signal quality during data transmission including disturbances such as attenuation delay distortion and noise. Noise is one of the most important factors and its presence can adversely affect digital signals causing errors and making it difficult to accurately interpret the data. To evaluate channel bandwidth and transmission quality concepts such as data rate bandwidth and signal-to-noise ratio (Eb/N0 ratio) are considered. Nyquist bandwidth and Shannon capacity are important concepts in information theory. The former determines the maximum transmission rate without interference while the Shannon capacity determines the theoretical maximum data rate that a channel can transmit without information loss. From a source coding perspective this technique presents information in a more compact format for efficient transmission or storage. Code terms and prefix mode are important aspects of code design that ensure proper decoding. Signal compression is an application of source code in which compression techniques such as scaling and encoding are used to reduce data size without losing important information. This compression is widely used in image processing and data transmission to save bandwidth and storage. Information theory and coding are fundamental to ensuring efficient and

reliable data transmission in communication systems and providing techniques for improving signal quality channel efficiency and bandwidth efficiency.

Keywords: *Nyquist band, Shannon ability.*

11.1. Elementos de Teoría de la Información

11.1.1. Perturbaciones en la Transmisión

La señal que se recibe puede variar de la que se transmitió, lo que nos enfrenta a dos situaciones clave: pérdida de señal en señales analógicas y errores de bits en señales digitales. Los errores debidos a la atenuación y la distorsión pueden atribuirse a factores como la distorsión en el retardo y la presencia de ruido en el canal de comunicación.

En el caso de señales analógicas, la pérdida de señal y la distorsión pueden deberse a varios factores, como la atenuación de la señal a medida que viaja a través del canal y la distorsión que se acumula debido a las características físicas del medio de transmisión. Esto incluye efectos como la dispersión y la interferencia electromagnética, que pueden degradar la calidad de la señal analógica.

Por otro lado, en señales digitales, los errores de bits son comunes y pueden resultar de la atenuación, el ruido y otros problemas. La atenuación causa la disminución de la energía de la señal a medida que viaja por el canal, lo que puede hacer que algunos bits sean difíciles de distinguir. Además, la presencia de ruido, como señales no deseadas o interferencia electromagnética, puede introducir errores en los bits de la señal digital.

En señales analógicas como en señales digitales, la pérdida de señal y los errores son desafíos importantes que deben abordarse en las comunicaciones para garantizar una transmisión precisa y confiable de la información.

11.1.2. Atenuación

La intensidad de la señal tiende a disminuir a medida que se propaga a través de la distancia en un canal de comunicación. Esta atenuación depende en gran medida del medio de transmisión y la distancia recorrida. En condiciones ideales, la intensidad de la señal recibida debería ser lo suficientemente fuerte para detectarla de manera confiable y, además, debería ser significativamente mayor que el nivel de ruido presente en el canal.

El ruido en el canal de comunicación, que puede surgir de diversas fuentes, aumenta con la frecuencia de la señal. En consecuencia, las frecuencias más altas de la señal pueden verse más afectadas por el ruido y, por lo tanto, podrían requerir amplificación adicional o ecualización para mantener la integridad de la señal.

En el contexto de señales digitales, esta situación es más manejable en comparación con señales analógicas. Las señales digitales se representan mediante secuencias discretas de bits, lo que permite una mayor capacidad de corrección y recuperación de errores. Además, se pueden aplicar técnicas como la ecualización para mejorar la calidad de la señal, compensando los efectos de la atenuación y el ruido.

La intensidad de la señal, la atenuación y el ruido son consideraciones importantes en las comunicaciones, y su manejo puede variar según el tipo de señal (analógica o digital) y el medio de transmisión utilizado.

11.1.3. Distorsión de Retardo

Este fenómeno es típico de los medios de transmisión guiados, en los cuales la velocidad de propagación de una señal depende de la frecuencia del medio. En una señal de onda finita, es importante destacar que la velocidad de propagación es mayor en las frecuencias cercanas al centro del espectro de frecuencia. Como resultado, los

componentes de diferentes frecuencias que componen una señal llegan al receptor en momentos distintos. (Shannon, 1948)

Esta variación en la velocidad de propagación causa un efecto de dispersión en la señal, lo que significa que las diferentes componentes de frecuencia se desplazan a diferentes velocidades. Como resultado, se produce un retardo entre estas componentes de frecuencia. Este retardo, conocido como retardo de dispersión, puede dar lugar a distorsiones en la señal recibida y dificultar la correcta interpretación de esta. (Armstrong, 1984)

Para contrarrestar los efectos de la dispersión, a menudo se aplican técnicas de ecualización en los sistemas de comunicación. La ecualización permite ajustar y sincronizar las distintas componentes de frecuencia de la señal para que lleguen al receptor en un momento similar, minimizando así los efectos negativos de la dispersión y mejorando la calidad de la comunicación en medios de transmisión guiados. (Buehler & Lunden, 1966)

11.1.4. Ruido

El ruido térmico es una señal adicional que se introduce en la comunicación entre emisor y receptor. Este tipo de ruido se debe a la agitación térmica de los electrones y aumenta de manera lineal con la temperatura absoluta ($N_0 = kT$). Este ruido térmico se distribuye de manera uniforme en el espectro de frecuencia y puede afectar la calidad de la señal transmitida. (Buehler & Lunden, 1966)

Entre las clases de ruido térmico, se destacan dos tipos:

1. Ruido Blanco: Este tipo de ruido térmico se caracteriza por su uniformidad en todo el espectro de frecuencias ($N_{BW} = kTB$). En otras palabras, afecta a todas las frecuencias por igual y se presenta como un ruido constante en todo el ancho de banda. El ruido blanco es un componente inherente en muchas comunicaciones y puede dificultar la recepción de señales claras.

2. Ruido de Intermodulación: Este tipo de ruido térmico también se debe a las reacciones térmicas de los electrones y aumenta linealmente con la temperatura absoluta. El ruido de intermodulación es un tipo de ruido adicional que se introduce entre el emisor y el receptor. Puede influir en la calidad de la señal y afectar la capacidad de discernir la información transmitida debido a la presencia de este ruido adicional en la comunicación.

Se tiene presente que el ruido térmico, que incluye el ruido blanco y el ruido de intermodulación, es un factor importante para considerar en las comunicaciones, ya que puede impactar la calidad y la fiabilidad de la señal transmitida, especialmente en situaciones en las que las condiciones térmicas juegan un papel relevante. (Pinto García, 2015)

11.1.5. Efecto del Ruido en Señal Digital

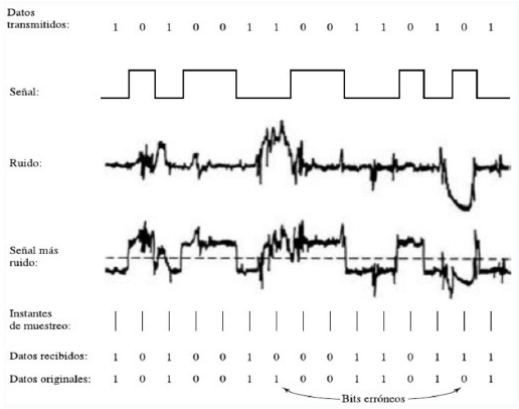


Fig. 169. Efecto del ruido en señal digital

11.2. Conceptos Relacionados con la Capacidad del Canal

11.2.1. Velocidad de datos

La velocidad de datos, medida en bits por segundo (bps), indica la tasa a la cual los flujos de datos pueden ser transmitidos. Es una medida fundamental en las comunicaciones que determina cuánta in-

formación puede ser transferida en un período de tiempo específico. La velocidad de datos es un parámetro crítico en las redes y sistemas de comunicación, ya que influye en la capacidad y el rendimiento de la transmisión de datos. Cuanto mayor sea la velocidad de datos, más información se puede transmitir en un tiempo dado, lo que a menudo se traduce en una comunicación más rápida y eficiente. (Proakis & Salehi, 2002)

11.2.2. Ancho de Banda

En el dominio de la frecuencia, la velocidad de datos se expresa en ciclos por segundo, lo que se denomina hercios (Hz). Esta velocidad está sujeta a limitaciones impuestas tanto por el emisor como por el medio de transmisión. Además, se tiene en cuenta la presencia de niveles de ruido que se mantienen a un nivel intermedio y una tasa de error a lo largo de la ruta de transmisión.

La tasa de error se mide comúnmente mediante el Bit Error Rate (BER), que indica la probabilidad de que un bit transmitido sea recibido incorrectamente, es decir, que un 0 sea interpretado como un 1 o viceversa. La BER es un indicador importante de la calidad de la comunicación, ya que cuanto menor sea esta tasa, mejor será la integridad de los datos transmitidos.

Es del caso decir que la velocidad de datos en el dominio de la frecuencia se mide en ciclos por segundo (Hz) y está sujeta a limitaciones impuestas por el emisor, el medio de transmisión y la tasa de error, representada por el BER. Un bajo BER es deseable, ya que indica una transmisión más confiable.

11.2.3. Ancho de Banda de Nyquist o ancho de banda teórico máximo

Para 2 niveles SIN RUIDO

Velocidad binaria C(bps)=2B(Hz).

Para M niveles SIN RUIDO

Velocidad binaria $C(bps)=2B(\text{Hz})\ \log_2 M(niveles)$

1 baudio = 1 estado señalización/sg

1 baudio = 1 bps si M=2

La relación entre la velocidad de transmisión C y la velocidad de modulación V es:

$$C(bps)=V(baudios)*\log_2 M$$

11.2.4. Capacidad de Shannon (I)

Para un determinado nivel de ruido, cuando se aumenta la velocidad de transmisión de datos, se reduce el período de cada bit transmitido, lo que significa que estos bits se transmiten en un período de tiempo más corto. Sin embargo, este aumento en la velocidad de transmisión puede tener como consecuencia una mayor tasa de error, lo que significa que existe una mayor probabilidad de que se produzcan errores en la recepción de los datos. Esto se debe a que, en el mismo intervalo de tiempo en el que antes solo se corría el riesgo de que se corrompiera 1 bit, ahora existe la posibilidad de que se corrompan 2 bits. (Shannon, 1948)

En otras palabras, cuanto más rápido se transmiten los datos, menos tiempo hay para detectar y corregir errores potenciales. Por lo tanto, si el nivel de ruido no cambia y se aumenta la velocidad de transmisión, la tasa de error puede aumentar debido a esta menor ventana de tiempo para la transmisión de cada bit.

Es importante señalar que la relación entre velocidad de transmisión y tasa de error puede variar según el tipo de medio de transmisión, el nivel de ruido y las técnicas de corrección de errores utilizadas. Por lo tanto, es esencial encontrar un equilibrio entre la velocidad de transmisión deseada y la tasa de error admisible para garantizar una comunicación confiable. (Shannon, 1948)

Relación Señal / Ruido (Signal Noise Ratio, SNR) en dB

$$SNR_{dB}=10 \log (SNR)=10 \log (Potencia_{señal}/Potencia_{ruido})$$

Restricción: no se puede aumentar M cuanto se quiera porque debe cumplirse:

$$M \leq \sqrt{1+SNR}$$

11.2.5. Capacidad de Shannon (II)

En teoría, aumentar tanto el ancho de banda (B) como la intensidad de la señal (S) debería incrementar la tasa de bits (C). Sin embargo, hay dos factores clave a considerar. Por un lado, al aumentar el ancho de banda (B), se introduce más ancho de banda disponible para transmitir información, lo que teóricamente debería aumentar la tasa de bits. Por otro lado, al aumentar la potencia de la señal (S), se espera una mejora en la relación señal-ruido y, en consecuencia, una mejor capacidad para transmitir datos a una tasa más alta. No obstante, hay limitaciones prácticas. A medida que se aumenta el ancho de banda (B), también se incrementa la exposición al ruido, lo que puede afectar la calidad de la señal y reducir la tasa de bits efectiva. Del mismo modo, aumentar la potencia de la señal (S) puede llevar a no linealidades en el sistema de transmisión, así como a un aumento del ruido de intermodulación, lo que puede limitar el rendimiento. (Shannon, 1948)

Por tanto, el caudal máximo teórico se verá influenciado por una serie de factores, incluyendo la relación señal-ruido, las características no lineales del sistema y las limitaciones del ancho de banda disponible. Calcular el caudal máximo teórico es una tarea compleja que implica equilibrar estos factores para lograr un rendimiento óptimo en la transmisión de datos.

$$C(bps) = V * \log_2 M = 2B \log_2 M = B \log_2 M^2$$

$$C_{MAX}(bps) = B(Hz) log_2(1+SNR)$$

11.3. Ley de Shannon (1948)

La cantidad de símbolos (o bits/baudio) que pueden utilizarse dependen de la calidad del canal, es decir de su relación señal/ruido. La Ley de Shannon expresa el caudal máximo en bits/s de un canal analógico en función de su ancho de banda y la relación señal/ruido:

Capacidad = BW * log2 (1 + S/N)

Donde: BW = Ancho de Banda y S/N = Relación señal/ruido.

11.3.1 Ejemplo

Canal entre 3 MHz y 4 MHz

Relación señal ruido = 24 dB, SNR=102,4=251

Calcular ancho de banda

Respuesta: B = 1 MHz

Calcular la velocidad binaria teórica máxima y el número de niveles

Respuesta: SNR = 251

Respuesta: C = 8 Mbps

Respuesta: M = 16 niveles

11.3.2. Relación Eb/N0 (I)

Eb: energía de señal por bit (Eb=S·Tb=S/R), siendo S potencia señal, Tb tiempo de un bit, R en bits/seg, N0 es la densidad de potencia de ruido dada en Hz. Se demuestra fácilmente que:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{\frac{S}{R}}{N_o} = \frac{S}{kTR}$$

O bien:

$$\frac{E_b}{N_o} = S_{dBW} - 10\log R - 10\log T + 228{,}6$$

11.3.3. Relación Eb/N0 (II)

Siendo k la constante de Boltzmann, cuyo valor es:

$$k=1,3803*10^{-23}\ J/(^{o}K)$$

y siendo T la temperatura absoluta en grados Kelvin

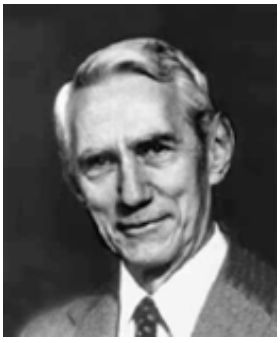
Ejemplo: Para obtener una relación Eb/N0 = 8,4 dB a una temperatura ambiente de 17 ºC (290 ºK) y una velocidad de transmisión de 2.400 bps, ¿qué potencia de señal recibida se necesita?

Respuesta:

$$S_{dBW}=-161,8$$

11.4. Teoría de la Información y Codificación

Claude Shannon estableció la Teoría de la Información Clásica



Especifica dos Teoremas Fundacionales:

1. Codificación de fuente silenciosa
2. Codificación de canal ruidoso

Reproduciado de C. E. Shannon, Bell System Technical Journal, vol. 27, pp. 379-423 and 623-656, July and October 1948. Reprinted with corrections from The Bell System Technical Journal, (Shannon, 1948)

11.4.1. Teoría de Shannon

Uno de ellos describe el máximo método de corrección de errores (codificación) posible a nivel de daños de audio y datos. (Shannon, 1948)

11.4.2. Shannon, Paper Bell Labs (1948)

Se muestra lo determinado en este artículo de la teoría de la comunicación matemática por C.E-SHANNON, que dice:

La elección de una base logarítmica corresponde a la elección de una unidad para medir la información. Si se usa la base 2, las unidades resultantes pueden llamarse dígitos binarios, o más brevemente bits, una palabra sugerida por J. W. Tukey. Un dispositivo con dos posiciones estables, como un relé o un circuito flip-flop, puede almacenar un bit de información. N tales dispositivos pueden almacenar N bits, ya que el número total de estados posibles es 2N y log2 2N = N. Si se usa la base 10, las unidades pueden llamarse dígitos decimales. Desde:

$$\log^2 M = \log_{10} M / \log_{10} 2$$

$$= 3{,}32 \log_{10} M$$

Estos aspectos semánticos de la comunicación son irrelevantes para el problema de ingeniería. El aspecto significativo es que el mensaje real es uno seleccionado de un conjunto de mensajes posibles. El sistema debe estar diseñado para operar para cada selección posible, no solo para la que se elegirá, ya que esto es desconocido en el momento del diseño.

Si el número de mensajes en el conjunto es finito, entonces este número o cualquier función monótona de este número puede considerarse como una medida de la información producida cuando se elige un mensaje del conjunto, siendo todas las opciones igualmente probables. Como señaló Hartley, la elección más natural es la función logarítmica. Aunque esta definición debe generalizarse considerablemente cuando consideramos la influencia de las estadísticas del mensaje y cuando tenemos un rango continuo de mensajes, en todos los casos utilizaremos una medida esencialmente logarítmica (traducción de C. E. Shannon, Bell System Technical Journal, vol. 27, pp. 379-423 and 623-656, July and October 1948).

Se desarrolla un método para representar geométricamente cualquier sistema de comunicación. Los mensajes y las señales correspondientes son puntos en dos "espacios de función", y el proceso de

modulación es un mapeo de un espacio en el otro. Utilizando esta representación, se deducen una serie de resultados en la teoría de la comunicación con respecto a la expansión y compresión del ancho de banda y el efecto umbral. Se encuentran fórmulas para la velocidad máxima de transmisión de dígitos binarios a través de un sistema cuando la señal es perturbada por varios tipos de ruido. Se discuten algunas de las propiedades de los sistemas "ideales" que transmiten a esta velocidad máxima. Se calcula el número equivalente de dígitos binarios por segundo para ciertas fuentes de información.

El reciente desarrollo de varios métodos de modulación, como PCM y PPM, que intercambian el ancho de banda por la relación señal-ruido, ha intensificado el interés en una teoría general de la comunicación. Una base para tal teoría se encuentra en los importantes trabajos de Nyquist y Hartley sobre este tema. En el presente trabajo ampliaremos la teoría para incluir una serie de nuevos factores, en particular el efecto del ruido en el canal, y los ahorros posibles debido a la estructura estadística del mensaje original y debido a la naturaleza del destino final de la información.

El problema fundamental de la comunicación es el de reproducir en un punto de manera exacta o aproximada un mensaje seleccionado en otro punto. Con frecuencia los mensajes tienen significado; es decir, se refieren o se correlacionan según algún sistema con ciertas entidades físicas o conceptuales. Estos aspectos semánticos de la comunicación son irrelevantes para el problema de ingeniería. El aspecto significativo es que el mensaje real es uno seleccionado de un conjunto de mensajes posibles. El sistema debe estar diseñado para funcionar para cada posible selección, no solo para la que realmente se elegirá, ya que esto es desconocido en el momento del diseño. Si el número de mensajes en el conjunto es finito, entonces este número, o cualquier función monótona de este número, puede considerarse como una medida de la información producida cuando se elige un mensaje del

conjunto, siendo todas las opciones igualmente probables. Como señaló Hartley, la elección más natural es la función logarítmica. Aunque esta definición debe generalizarse considerablemente cuando consideramos la influencia de las estadísticas del mensaje y cuando tenemos un rango continuo de mensajes, en todos los casos utilizaremos una medida esencialmente logarítmica. (Traducción de C. E. Shannon (January 1949). "Communication in the presence of noise" Proc. Institute of Radio Engineers vol. 37 (1): 10–21. (Shannon, 1948)

11.5. Modelo de un Sistema de Comunicaciones

"Si la tasa de información es menor que la capacidad del canal existe una técnica de codificación tal que la información puede transmitirse con muy poca probabilidad de error a pesar de la interferencia o la presencia de ruido." (Shannon, 1948; Haykin, 2005)

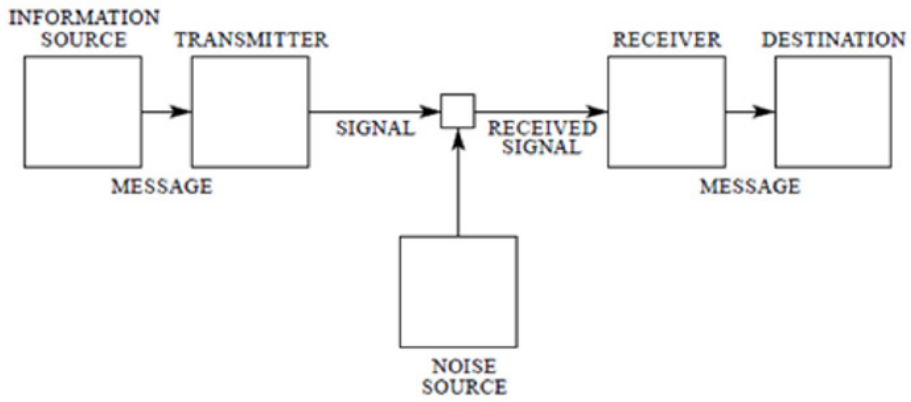


Fig. 170. Diagrama de bloques, sistema general de comunicaciones

11.6. Definición: unidades

Si se introduce el logaritmo de base 2, la unidad correspondiente se denomina bit.

$$I(E) = \log_2 \frac{1}{P(E)} \ bits$$

Empleando logaritmos naturales, la unidad de información recibe el nombre de nat.

$$I(E) = \ln \frac{1}{P(E)} \ nats$$

En el caso de logaritmos de base 10, la unidad de información es el Hartley. R. V. Hartley fue quien primero sugirió la medida logarítmica de la información (Hartley, 1928).

$$I(E) = \log_{10} \frac{1}{P(E)} \ Hartleys$$

11.6.1. 1 Bit

Note que también, que si P(E)=1/2, será I(E) = 1 bit Explicado de forma sencilla, un bit es la cantidad de información que se obtiene al elegir entre dos opciones igualmente probables.

11.6.2. Fuente de memoria nula

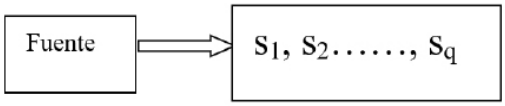


Fig. 171. Fuente de información

Imagine que se tiene una fuente que emite una secuencia de símbolos pertenecientes a un conjunto finito y predefinido, representado como S = {s1, s2, ..., sq}. Estos símbolos se seleccionan consecutivamente siguiendo una ley de probabilidad estándar. Es importante destacar que, en este contexto, la "fuente" se refiere a la entidad generadora de estos símbolos, y no debe confundirse con el conjunto S en sí. (Shannon, 1948)

En las fuentes simples, se asume que los símbolos transmitidos son estadísticamente independientes entre sí. Estas fuentes de informa-

ción se conocen como "fuentes de memoria vacía" porque no mantienen memoria de los símbolos previamente emitidos y cada símbolo se selecciona independientemente en función de su probabilidad de ocurrencia.

La descripción completa de una fuente de información simple se logra especificando el conjunto de símbolos S que puede emitir y las respectivas probabilidades de ocurrencia de cada símbolo en la secuencia. Esto proporciona una representación de cómo la fuente genera los datos y cómo se distribuyen los símbolos en la secuencia de salida. Estas fuentes de memoria vacía son fundamentales en la teoría de la información y la codificación de datos. (Tomasi, 2003)

$$P(s_1),\ P(s_2),\ \ldots,\ P(s_q)$$

La información promedio proporcionada por una fuente de información de memoria vacía se puede calcular de la siguiente manera: La presencia del símbolo s, corresponde a una cantidad de información igual a:

$$I(S_i) = \log\frac{1}{P(S_i)}\ bits$$

$$I(s_i) = \log\frac{1}{P(s_i)} \quad \text{bits}$$

11.6.3. Entropía

La probabilidad de que ocurra es exactamente P(S1), por lo que la cantidad promedio de información por símbolo de la fuente es:

$$\sum_S P(s_i)\, I(s_i) \quad \text{bits}$$

Donde $\sum_S P(S_i) I(S_i)$ bits representa la suma de expansión para q símbolos de la fuente S. Esta magnitud definida, que es la cantidad promediada de información por símbolo de la fuente, es lo que se denomina entropía H(S) de una fuente de memoria en estado nulo.

$$H(S) \equiv \sum_S P(S_i) \log\frac{1}{P(S_i)}\ bits$$

La entropía de un mensaje X, representada por H(X), es el promedio ponderado de la cantidad de información en los diferentes estados del mensaje.

$$H(X) = -\sum p(x) \log_2 p(x)$$

La variable a la que te refieres es una medida de la incertidumbre que depende de la media y del número de puntos de datos. La noción de incertidumbre puede ser relacionada con la variable H. Es importante destacar que la función de entropía se utiliza para representar esta incertidumbre, aunque a menudo se da por sentada. La entropía en este contexto se refiere a la medida de incertidumbre en la información. (Stremler, 2008)

La entropía puede considerarse como la media de los datos proporcionados por cada señal emitida por la fuente. En otras palabras, es una forma de calcular el promedio ponderado de la información contenida en los símbolos generados por la fuente. Cuanto mayor sea la entropía, mayor será la incertidumbre o variabilidad en los datos transmitidos por la fuente. La entropía es un concepto fundamental en la teoría de la información y se utiliza en diversos campos, incluida la teoría de la comunicación y la estadística.

11.6.4. Entropía, Fuente Binaria

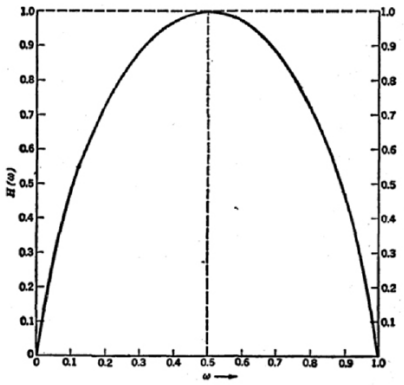


Fig. 172. H(w), Función de entropía

11.7. Propiedades de la Entropía

La entropía es siempre un valor no negativo y solo alcanza su valor mínimo (cero) cuando una variable de estado toma el valor de 1 mientras que todas las demás variables toman el valor de 0. Esto implica que la entropía es máxima cuando la incertidumbre en el mensaje es alta, es decir, cuando todas las variables tienen igual probabilidad de ocurrencia. En otras palabras, cuanto mayor es la incertidumbre en los valores de una variable o mensaje, mayor será la entropía asociada con ese mensaje. (Menso, 2020)

La entropía es una medida de la incertidumbre o variabilidad en un conjunto de datos o un mensaje. Cuanto mayor sea la incertidumbre, mayor será la entropía. Estos conceptos son empíricamente consistentes y se utilizan en teoría de la información y estadística para cuantificar la información y la incertidumbre en un conjunto de datos.

Si hay n estados equiprobables, entonces pi = 1/n.

Luego:

$$H(X) = -\sum pi\ log2\ pi = -n(1/n)\ log2\ (1/n) = -(log2\ 1 - log2\ n)$$

$$H(X)máx = \log_2 N$$

11.7.1. Entropía Condicional

Si hay una segunda variable Y que afecta a X, esto proporcionará información adicional importante.

$$H(X/Y) = -\ S\ p(x,y)\ log2\ p(x,y)$$

$$x, y$$

Donde p(x,y) = p(y)p(x/y) La relación p(x/y) es la probabilidad de alcanzar el estado X dado un valor Y. Entropía reducida. más orden menos incertidumbre.

$$H(X/Y) = - \sum_{y} p(y) \sum_{x} p(x/y) \log 2\, p(x/y)$$

11.7.2. Ejemplo 1

Sea $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ con $p(x_i) = 0.25$

Sea ahora $Y = \{y_1, y_2, y_3\}$ con $p(y_1) = 0.5$; $p(y_2) = 0.25$; $p(y_3) = 0.25$

Luego $H(X) = 4 \log_2 4 = 2.0$ y $H(Y) = 2 \log_2 4 + \log_2 2 = 1.5$

Además, hay las siguientes dependencias entre X e Y:

Si $Y = y_1$ Þ $X = x_1$ o x_2 o x_3 o x_4 (cualquiera con igual probabilidad)

Si $Y = y_2$ Þ $X = x_2$ o x_3 (cualquiera con igual probabilidad)

Si $Y = y_3$ Þ $X = x_3$ o x_4 (cualquiera con igual probabilidad)

Como $H(X/Y) = - \sum_{y=1} p(_y) \sum_{x=1} p(_{x/y}) \log 2\, p(_{x/y})$

$H(X/Y) = - p(y_1)[p(x_1/y_1)\log_2 p(x_1/y_1) + p(x_2/y_1)\log_2 p(x_2/y_1) + p(x3/y1)\log_2 p(x_3/y_1) + p(x_4/y_1)\log_2 p(x_4/y_1)]$

$- p(y_2)[p(x_1/y_2)\log_2 p(x_1/y_2) + p(x_2/y_2)\log_2 p(x_2/y_2) + p(x_3/y_2)\log_2 p(x_3/y_2) + p(x_4/y_2)\log_2 p(x_4/y_2)]$

$- p(y_3)[p(x_1/y_3)\log_2 p(x_1/y_3) + p(x_2/y_3)\log_2 p(x_2/y_3) + p(x_3/y_3)\log_2 p(x_3/y_3) + p(x_4/y_3)\log_2 p(x_4/y_3)]$

Calculando, se obtiene $H(X/Y) = 1.0 + 0.25 + 0.25 = 1.5$. La entropía de X ha bajado en medio bit con el conocimiento de su relación con y.

11.8. Extensión de una Fuente de Memoria Nula

$$H(s^n)=nH(S)$$

11.8.1. Ejemplo 2.

Considere a k como la extensión de segundo orden de la fuente del Ejemplo 1. Se debe recordar que la fuente tenía un alfabeto S = {S1, S2, S3 } con P(s1)=1/2 y P(S2)= P(S3)=1/4. Así la fuente s2 tendrá los nueve símbolos siguientes:

Símbolos de S^2 … … … … …	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7	σ_8	σ_9
Secuencia correspondiente a los Símbolos de S … … … … …	S_1S_1	S_1S_2	S_1S_3	S_2S_1	S_2S_2	S_2S_3	S_3S_1	S_3S_2	S_3S_3
Probabilidad de $P(\sigma_i)$	1/4	1/8	1/8	1/8	1/16	1/16	1/8	1/16	1/16

$$H(S^2) = \sum_{S^2} P(\sigma i) \log \frac{1}{P(\sigma i)}$$

$$= 3 \ \frac{bits}{simbolo}$$

$$= \frac{1}{4}\log 4 \ + 4 \times \frac{1}{8}\log 8 \ + \ 4 \times \frac{1}{16}\log 16$$

11.9. Fuente de Markov

$$P(S_i \mid S_{i1},S_{i2},S_{i3},\ldots,S_{im}) \ para \ i=1,2,\ldots,q;i=1,2,3\ldots.$$

En un proceso de fuente de Markov, la probabilidad de ocurrencia de cada señal se basa en las m señales anteriores. Esto significa que el estado actual de la fuente en el sistema de Markov se determina mediante las últimas m señales que han ocurrido. Al considerar diferentes señales q, el principio de Markov contempla un sistema con un

total de q^m posibles estados distintos. El estado de la fuente cambia cada vez que se inicia una nueva señal. Una forma efectiva de analizar el comportamiento de una fuente Markoviana es utilizando un diagrama de estados. En este diagrama, cada uno de los q^m estados posibles se representa como un nodo o punto. Las transiciones entre estos estados se indican con flechas que muestran cómo se pasa de un estado a otro cuando se observa una nueva señal. Este enfoque permite visualizar y comprender mejor el funcionamiento de la fuente y cómo evoluciona con el tiempo. (Buchman, 1962) (Armstrong, 1984) (Sundberg, 1986)

La secuencia de símbolos implicada por la probabilidad condicional

$$P(S_i \mid S_{i1},S_{i2},S_{i3},....,S_{im}).$$

es S_{f1}, S_{f2},.... S_{fm} Sn, Si. Es decir, Si va detrás de S_{im}

Ejemplo: Considere una fuente de Markov de segundo orden con un alfabeto binario s={0,1}. Suponga que las probabilidades condicionales son:

P(0/00)=P(1/11)=0.8

P(1/00)=P(0/11)=0.2

P(0/01)=P(0/10)= P(1/01)=P(1/10)=0.5

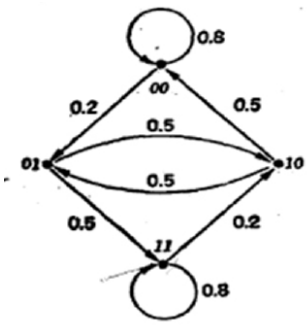


Fig. 173. Diagrama de estados de una fuente de Markov de segundo orden

11.10. Codificación de Fuente

La codificación de fuente es un proceso que se utiliza para definir la relación entre los símbolos tipográficos y los símbolos de código utilizados en la transmisión de información. Su principal objetivo es mejorar la eficiencia de la transmisión al eliminar redundancias en la representación de los datos. (Proakis & Salehi, 2002)

En esencia, la codificación de fuente busca una representación más compacta y eficiente de la información, lo que significa que los datos se transmiten de manera más efectiva, ocupando menos espacio o recursos. Al eliminar redundancias, se puede lograr una comunicación más rápida y con un menor consumo de recursos, lo que es fundamental en sistemas de transmisión de datos, compresión de información y muchas otras aplicaciones donde la eficiencia es esencial. (Medina Delgado et al., 2017)

11.11. Condiciones del Código

En el contexto de codificación de fuente, se establecen ciertas condiciones para que un código sea efectivo. Estas condiciones son las siguientes:

- **Singular:** Un código singular asegura que cada símbolo tipográfico se corresponde de manera única con un símbolo de código. En otras palabras, no hay ambigüedad en la interpretación de los símbolos.
- **Separable** (Únicamente decodificable): Un código separable garantiza que no hay superposición de símbolos de código que puedan generar confusiones en el proceso de decodificación. Cada secuencia de símbolos tipográficos se puede decodificar de manera única en la secuencia correspondiente de símbolos de código.
- **Instantáneo:** Un código instantáneo se caracteriza por la propiedad de que ningún símbolo de código es un prefijo de otro símbo-

lo de código. Esto facilita la decodificación, ya que no es necesario esperar para saber qué símbolo de código se ha transmitido, sino que se puede decodificar de manera inmediata.

Estas condiciones son fundamentales para garantizar que la codificación de fuente sea efectiva y que no haya ambigüedades en la interpretación de los datos codificados. Códigos que cumplen con estas condiciones son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones, como la compresión de datos y la transmisión de información de manera eficiente. (Cook, 1967)

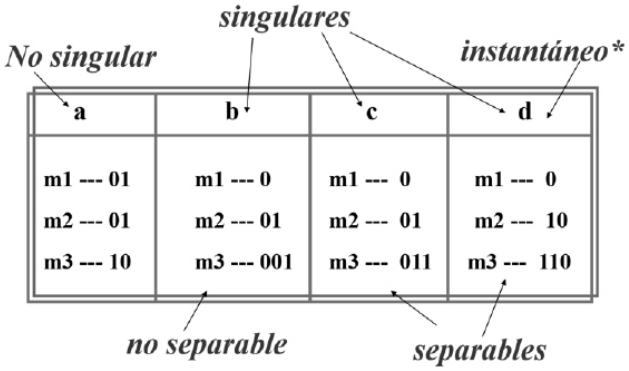


Fig. 174. Condiciones para la definición de un código.

11.12. Condición de los prefijos

Una condición necesaria y suficiente para una instancia de código es que la palabra satisfaga la condición de prefijo, es que no exista palabra que sea prefijo de otra palabra de longitud mayor.

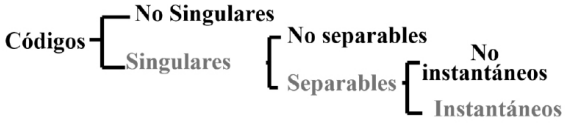


Fig. 175. Clasificación de los Códigos.

11.13. Códigos Eficientes

Estrategia: Asignar palabras más cortas a símbolos más probables.

l_i longitud de la palabra codificada del mensaje m_i

r : # de símbolos del alfabeto del código

$L = S\ p_i l_i$: Longitud promedio de la palabra*

Relación entre L y H

$$L \log r \geq H(s)$$

log r : Cantidad promedio máxima de información de un símbolo del código.

Eficiencia del código:

$$\eta = H(S) / (L \log r)$$

Considere un código instantáneo con un alfabeto fuente $S = \{S_1, S_2, ...S_q\}$, y un alfabeto código $X = \{X_1, X_2, ...X_r\}$. Se tiene que a $X_1, X_2, ...X_r$ se le denomina código y hace referencia a la definición de POE V. longitud de palabra (es decir, el número de símbolos del código). En general, es importante que el código sea lo más corto posible. Las condiciones necesarias y suficientes para la existencia de palabras de código de longitud III se definen ahora mediante la desigualdad de Kraft (Carlson, 2007).

En el contexto de la teoría de códigos, se considera un código instantáneo con un alfabeto fuente denotado como $S = \{S_1, S_2, ..., S_q\}$, y un alfabeto código $X = \{X_1, X_2, ..., X_r\}$. Cada Xi representa un código específico en este conjunto de códigos.

La longitud de palabra se refiere al número de símbolos en la representación de código de un elemento en S. Es esencial que las palabras de código sean lo más cortas posible para ahorrar espacio y recursos en la transmisión de información.

Las condiciones necesarias y suficientes para la existencia de palabras de código de longitud l se determinan mediante la desigualdad de Kraft. Esta desigualdad, propuesta por Abraham Kraft en 1949, establece una relación entre las longitudes de palabra de un código instantáneo y la probabilidad de ocurrencia de los símbolos fuente.

La desigualdad de Kraft juega un papel fundamental en la teoría de códigos y permite establecer restricciones sobre las longitudes de palabra para asegurar que un código sea eficiente y únicamente decodificable. Cumplir con esta desigualdad es esencial para el diseño y análisis de códigos en aplicaciones como la compresión de datos y la transmisión de información.

La condición necesaria y suficiente para la existencia de un código instantáneo de longitud l, es que:

$$\sum_{i=1}^{d} r^{-li} \leq l$$

Donde r es el número de símbolos distintos que componen el código alfabético. En el caso de alfabetos binarios, la desigualdad de Krafts se convierte en:

$$\sum_{i=1}^{d} 2^{-li} \leq l$$

La suma se aplica a todas las palabras del bloque de código. La ecuación de Krafts establece que el segundo argumento del logaritmo del segundo término debe ser menor o igual que 1 para que el exponente sea instantáneo. Por lo tanto, su logaritmo debe ser menor o igual que cero, así:

$$\boldsymbol{H\,(S)\ \leq\ L\,log\,r}$$

O bien:

$$\frac{\boldsymbol{H\,(S)}}{\boldsymbol{log\,r}}\ \leq\ \boldsymbol{L}$$

H (S) viene medida en bits en la ecuación anterior. Hay que recordar que L es el número medio de símbolos utilizados para codificar S. Expresando la entropía asimismo en unidades r-arias, como en la relación, puede escribirse en la forma:

$$\mathbf{H_r\,(S) \leq L}$$

Ejemplo:

Considere la fuente $\boldsymbol{S} = \{\boldsymbol{S_1}, \boldsymbol{S_2}, \boldsymbol{S_3}\}$ con $\boldsymbol{P(S_1)} = \frac{1}{2}$ y $\boldsymbol{P(S_2)} = \boldsymbol{P(S_3)} = \frac{1}{4}$

La ecuación deduce

$$H(\boldsymbol{S}) = \frac{1}{2}\log 2 + \frac{1}{4}\log 4 + \frac{1}{4}\log 4$$

$$= \frac{3}{2}\ bits$$

Entonces

$$H_r(\boldsymbol{S}) = \frac{H(S)}{\log r} \qquad \log_4 x = \frac{1}{\log_b a}\log_b x$$

Si se mide I(S_i) en unidades de orden r, H(S) vendrá dada en la misma unidad y se tendrá:

$$H_r(S) = \sum_R P(S_i)\log_r \frac{1}{P(\sigma i)}\ unidades\ de\ orden\ r$$

11.14. Codificador Óptimo

Falta encontrar el segundo término pendiente en la definición de cantidad de información: codificador óptimo. Introduciendo el signo negativo dentro del logaritmo en la expresión de la entropía, ésta quedará como:

$$H(X) = S\ p(x)\log2\,[1/p(x)]$$

A continuación, vea un ejemplo de codificación. La expresión log2 [1/p(x)] representa el número necesario de bits para codificar el mensaje X en un codificador óptimo. Codificador óptimo es aquel que para codificar un mensaje X usa el menor número posible de bits. (Buehler & Lunden, 1966)

Codificación de Huffman:

Mensaje: MI MAMA ME MIMA

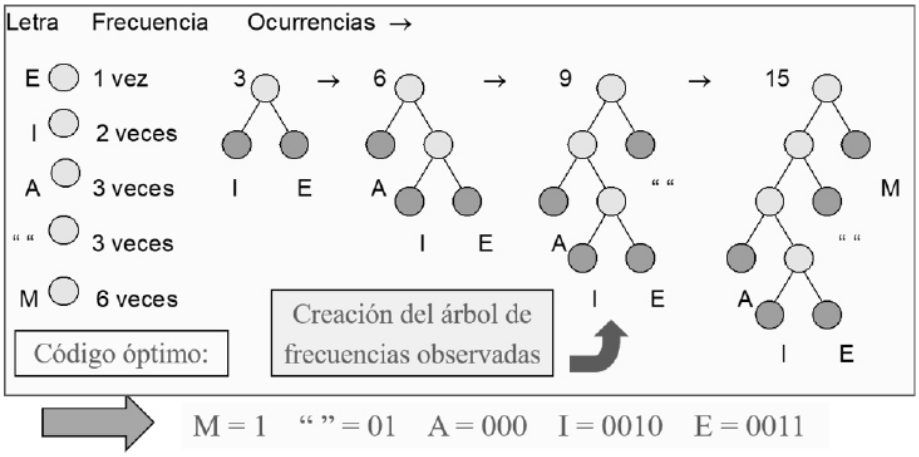


Fig. 176. Mensaje con Codificación de Huffman

Mensaje: 1 0010 01 1 000 1 000 01 1 0011 01 1 0010 1 000 (33 bits)

Pregunta: ¿Con cuántos bits se codificaría si se usara ASCII? Saque conclusiones.

11.15. Compresión de las Señales

Consiste en reducir el código que procesa (transfiere o registra) la información. En teoría, la compresión pretende transmitir la misma información, pero utilizando el menor espacio posible.

Ocupación espectral de 30 Mbits / seg a 40 Mbits / seg, para poder sr utilizado por una transmisión:

via satélite de 27 Mhz a 36 Mhz

canal de cable de 6 Mhz a 8 Mhz

El espacio ocupado por la información codificada de forma (señal de datos digitales, etc.) es la relación entre la frecuencia de muestreo y la resolución. Por tanto, cuantos más bits se utilicen, mayor será el tamaño del archivo.

11.16. Técnicas de Compresión

Codificación por entropía, Se tiene a las técnicas de base como Run-length Coding (RLC), Codificación de Huffmanm y la Aritmética. En la codificación de fuente, se tiene a las técnicas básicas como Prediction, que se relaciona con el DPCM y DM; y las transformadas como la DCTy la FFT. La codificación en Capas tiene entre estas a la Bit position, Subsampling, Sub-band Coding. También tiene a la Vector Quantization. La codificación híbrida tiene entre sus técnicas base a JPEG, MPEG, H.263, y las que son de sistemas propietarios.

11.17. Compresión de las Señales

Se hace mediante el siguiente proceso:

- Se buscan repeticiones en la serie de datos.
- Se almacena solo el dato junto al número de veces que se repite.

Ejemplo: Si en un archivo aparece una secuencia como "AAAAAA", ocupando 6 bytes, se podría almacenar simplemente "6A" que ocupa solo 2 bytes. (Blake, 2006)

11.18. Algoritmos de Compresión

Se pueden considerar los siguientes:

- **Huffman:** Comprueba los caracteres más frecuentes y los codifica en forma abreviada.

- **LZW:** Crea un diccionario de instancias encontradas y hace referencia a ese diccionario.

11.19. Consideraciones Clave

Las consideraciones clave aquí giran en torno a la redundancia en la información, que se refiere a la gestión de datos repetitivos o predecibles. La entropía, por su parte, representa la diferencia entre la cantidad total de datos en un mensaje y su redundancia, lo que se puede describir como información aparentemente innecesaria. (Buchman, 1962)

La redundancia en el mensaje se puede percibir como información que no agrega valor o contenido esencial. La información que no se puede evaluar y cuya eliminación no altera el mensaje se considera, en cierto sentido, irrelevante. Lo esencial radica en la información que aporta valor y significado real al mensaje. Por lo tanto, cualquier información, incluida la redundante, que se considere necesaria no es innecesaria ni irrelevante. Para poder reconstruir la señal de manera completa y sin pérdidas, se requiere que se transmita en su totalidad.

En este contexto, el concepto de personalización se refiere a la eliminación de información innecesaria e irrelevante. Sin embargo, esta personalización debe hacerse de manera subjetiva y con precaución. Al eliminar información, existe el riesgo de que falte cierta cantidad de datos subyacentes, lo que puede llevar a la recuperación de mensajes con errores comprensibles pero tolerables.

El equilibrio entre la redundancia y la información es crucial para garantizar que los mensajes transmitidos sean efectivos y comprensibles. La personalización selectiva puede ser útil, pero se debe aplicar con sensibilidad para no comprometer la integridad del mensaje. (Tropena, 2006)

11.20. Tipos de Codificación de las Señales

11.20.1. Codificación de Longitud de Ejecución o Run Length Coding (RLC)

La codificación de Longitud de Ejecución o Run Length Coding (RLC) es una técnica que se emplea especialmente cuando la información presenta secuencias extensas de elementos idénticos.

En el proceso de codificación, se representa cada elemento junto con el número de veces que se repite en la secuencia. Esta técnica es completamente reversible, lo que significa que no se pierde información durante el proceso de codificación y decodificación.

El RLC encuentra aplicaciones en diversos campos, pero es especialmente relevante en el ámbito de la informática. Se utiliza en algoritmos y programas de compresión de datos como los formatos de archivos Zip, Arc y otros similares. Esta técnica permite comprimir la información de manera eficiente al eliminar la redundancia de elementos repetidos, lo que resulta en un ahorro significativo de espacio de almacenamiento o ancho de banda al transmitir datos a través de una red.

11.20.2. Codificación de Longitud Variable o Variable Length Coding (VLC)

La codificación de Longitud Variable o Variable Length Coding (VLC) es una técnica que se utiliza cuando la probabilidad de que los elementos en una información tengan la misma codificación es baja. En esta técnica, se asignan menos bits a los elementos que aparecen con mayor frecuencia y más bits a los elementos que son más raros en la información. (Buehler & Lunden, 1966)

Una característica importante de la codificación de longitud variable es que no todos los elementos tienen la misma longitud de código. Esto permite una representación más eficiente de la información, ya

que se dedican menos bits a los elementos comunes y más bits a los elementos menos frecuentes.

Sin embargo, uno de los inconvenientes de la codificación de longitud variable es que requiere conocer previamente la serie de elementos que se van a transmitir. Esto significa que no es adecuada para aplicaciones en tiempo real en las que la información se genera o transmite de manera continua y no se conoce de antemano. Esta técnica es más apropiada para aplicaciones en las que se puede realizar un análisis previo de los datos antes de la codificación y decodificación.

11.20.3. Transformada de Coseno Discreta o Discrete Cosine Transform (DCT)

La Transformada de Coseno Discreta (DCT) es una técnica que se utiliza en el procesamiento de imágenes y señales para analizar y representar señales discretas o muestras. Es un caso especial de la transformada de Fourier aplicada a señales discretas, lo que significa que se puede utilizar para descomponer una señal en una serie de componentes de senos y cosenos.

Cuando se aplica la DCT a una imagen, se trabaja con una señal muestreada bidimensional, lo que significa que se toma en cuenta tanto la información horizontal como vertical. La imagen se divide en bloques de píxeles de tamaño N x N, y luego se aplica la transformada a cada bloque.

La transformada DCT convierte estos bloques de píxeles en otro conjunto de N x N coeficientes, que representan la amplitud de cada uno de los componentes cosenos armónicos que componen la señal. Estos coeficientes se utilizan para representar la imagen de manera más eficiente y realizar compresión de imágenes, ya que los coeficientes de baja amplitud pueden ser descartados sin perder mucha información visual.

En resumen, la DCT es una técnica utilizada en el procesamiento de imágenes para descomponer la información de una imagen en componentes de cosenos armónicos, lo que permite una representación eficiente y compresión de la imagen. (Tropena, 2006)

11.20.4. Proceso de DCT

La imagen se fragmenta en bloques de 8 x 8 píxeles. En el dominio transformado, el coeficiente de frecuencia horizontal se desplaza desde la izquierda hacia la derecha en el eje horizontal, mientras que el coeficiente de frecuencia vertical aumenta de arriba abajo en el eje vertical.

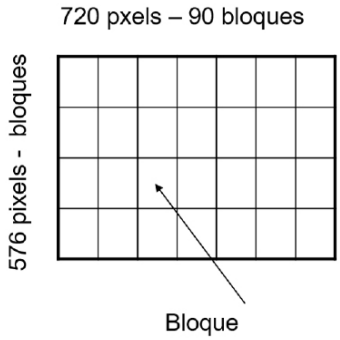


Fig. 177. Matriz para la DCT

11.20.5. Bloque de 8 x 8 pixels en DCT

$$\begin{bmatrix} 52 & 55 & 61 & 66 & 70 & 61 & 64 & 73 \\ 63 & 59 & 55 & 90 & 109 & 85 & 69 & 72 \\ 62 & 59 & 68 & 113 & 144 & 104 & 66 & 73 \\ 63 & 58 & 71 & 122 & 154 & 106 & 70 & 69 \\ 67 & 61 & 68 & 104 & 126 & 88 & 68 & 70 \\ 79 & 65 & 60 & 70 & 77 & 68 & 58 & 75 \\ 85 & 71 & 64 & 59 & 55 & 61 & 65 & 83 \\ 87 & 79 & 69 & 68 & 65 & 76 & 78 & 94 \end{bmatrix}$$

Fig. 178. Matriz para proceso DCT. Bloque 8x8.

Bloque de 8 x 8 pixels. Los valores representan la intensidad luminosa de un píxel

A los coeficientes se les resta 128 para que queden números entorno al 0, entre -127 y 127.

$$\begin{bmatrix} -76 & -73 & -67 & -62 & -58 & -67 & -64 & -55 \\ -65 & -69 & -73 & -38 & -19 & -43 & -59 & -56 \\ -66 & -69 & -60 & -15 & 16 & -24 & -62 & -55 \\ -65 & -70 & -57 & -6 & 26 & -22 & -58 & -59 \\ -61 & -67 & -60 & -24 & -2 & -40 & -60 & -58 \\ -49 & -63 & -68 & -58 & -51 & -60 & -70 & -53 \\ -43 & -57 & -64 & -69 & -73 & -67 & -63 & -45 \\ -41 & -49 & -59 & -60 & -63 & -52 & -50 & -34 \end{bmatrix}$$

Fig. 179. Matriz para proceso DCT. Bloque 8x8. Resta de 128.

La DCT convierte el contenido de un bloque en los coeficientes de una matriz de 8 x 8. La primera (parte superior izquierda del mensaje 0 0) muestra el componente continuo (CC) que representa la densidad media del bloque. La segunda (abajo a la derecha) muestra los componentes de mayor frecuencia espacial de los dos ejes.

$$\begin{bmatrix} -415 & -30 & -61 & 27 & 56 & -20 & -2 & 0 \\ 4 & -22 & -61 & 10 & 13 & -7 & -9 & 5 \\ -47 & 7 & 77 & -25 & -29 & 10 & 5 & -6 \\ -49 & 12 & 34 & -15 & -10 & 6 & 2 & 2 \\ 12 & -7 & -13 & -4 & -2 & 2 & -3 & 3 \\ -8 & 3 & 2 & -6 & -2 & 1 & 4 & 2 \\ -1 & 0 & 0 & -2 & -1 & -3 & 4 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -4 & -1 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

Fig. 180. Matriz para proceso DCT. Bloque 8x8. Proceso Final.

Una representación visual de la contribución de la representación original de bloques de 8 x 8 píxeles.

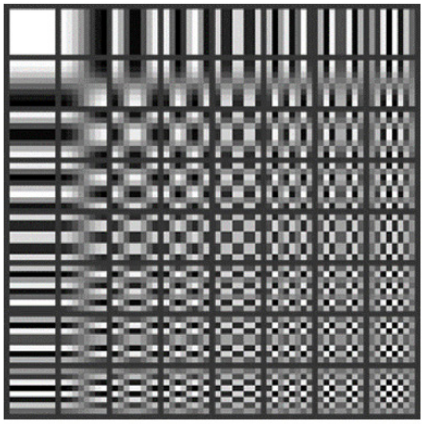


Fig. 181. Representación Visual de la DCT. Bloque 8x8.

11.21. Consideraciones Finales

Esto depende del número de detalles presentes en el bloque de transacciones. La mayoría de la energía tiende a concentrarse en unos pocos múltiplos en la esquina superior izquierda. Además, las transacciones se consideran independientes entre sí. A medida que la frecuencia aumenta, disminuye la precisión del coeficiente obtenido. (Carlson, 2007)

11.22. Características del Ojo Humano

La DCT detecta cambios sutiles en la luminosidad en una amplia área, pero no es eficiente para captar cambios rápidos de brillo en zonas pequeñas. Esto facilita la eliminación de componentes de alta frecuencia sin afectar significativamente la calidad visual, lo que es evidente en el coeficiente correspondiente a 0. Sin embargo, cuando se aplica este proceso a las imágenes, se produce una pérdida considerable de información y calidad. (Carlson, 2007)

11.23. Ejemplo de una Matriz de Cuantificación Típica

$$\begin{bmatrix} 16 & 11 & 10 & 16 & 24 & 40 & 51 & 61 \\ 12 & 12 & 14 & 19 & 26 & 58 & 60 & 55 \\ 14 & 13 & 16 & 24 & 40 & 57 & 69 & 56 \\ 14 & 17 & 22 & 29 & 51 & 87 & 80 & 62 \\ 18 & 22 & 37 & 56 & 68 & 109 & 103 & 77 \\ 24 & 35 & 55 & 64 & 81 & 104 & 113 & 92 \\ 49 & 64 & 78 & 87 & 103 & 121 & 120 & 101 \\ 72 & 92 & 95 & 98 & 112 & 100 & 103 & 99 \end{bmatrix}$$

Fig. 182. Matriz para Cuantificación Típica. Bloque 8x8.

La matriz de cuantización se genera al dividir cada matriz de la imagen transformada por los valores de una matriz de cuantización específica.

$$\begin{bmatrix} -26 & -3 & -6 & 2 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & -4 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 1 & 5 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -4 & 1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Fig. 183. Matriz para Cuantificación con resultados. Bloque 8x8.

11.24. Compresión de Imágenes Fijas

11.24.1. Joint Photographic Experts Group (JPEG)

Es un estándar de compresión utilizado para imágenes fotográficas que pueden variar en resolución. JPEG permite la compresión de imágenes de forma con o sin pérdida, lo que significa que es posible comprimir imágenes con pérdida de calidad o sin ella, según la finalidad y la relación de compresión requerida. Para la mayoría de las aplicaciones generales, es aceptable cierta pérdida de calidad, lo que

permite alcanzar relaciones de compresión superiores a 10 sin que se aprecie una degradación significativa del rendimiento. (Tanenbaum, 2003)

11.24.2. Etapa de la compresión

La compresión se descompone en 6 etapas:

1. Descomposición en bloques.
2. Transformación mediante DCT.
3. Discriminación por umbral y cuantificación.
4. Lectura en zigzag.
5. Codificación RLC.
6. Codificación entrópica de Huffman (VLC).

11.24.2.1. Descomposición en bloques

La imagen original se fragmenta en unidades fundamentales de 8 x 8 píxeles, utilizando el formato Y Cb Cr. Si se considera una imagen CCIR 601 con dimensiones de 720 x 576 píxeles, se obtienen un total de 6480 bloques para la luminancia y 3240 bloques para cada componente de crominancia. En el proceso de digitalización con una precisión de 8 bits, cada uno de estos bloques se representa como una matriz de 64 números. En este contexto, el rango de valores de 0 a 255 determina la intensidad luminosa, mientras que el rango de -128 a +128 se emplea para representar las variaciones en la información de color y contraste.

11.24.2.2. Transformación Mediante DCT

Crea una matriz de 8 x 8 elementos para cada bloque YCbCr con coeficientes de frecuencia espacial.

11.24.2.3. Discriminación por Umbral y Cuantificación

La discriminación por umbral y cuantificación es un enfoque que se basa en la percepción visual humana. En la realidad, los ojos no pueden discernir detalles muy finos cuando la intensidad de luz es demasiado baja. Debido a este fenómeno, en la compresión de imágenes, los coeficientes de frecuencia que caen por debajo de un cierto valor se establecen en 0, eliminando efectivamente la información visual que no es fácilmente perceptible. A medida que se avanza hacia frecuencias más altas en la imagen, los coeficientes que representan características visuales se registran con una menor precisión, ya que los detalles a esas frecuencias tienden a ser menos notorios para el observador humano. Esto ayuda a optimizar la representación de la imagen, centrándose en lo que es más relevante y significativo desde una perspectiva visual. (Proakis & Salehi, 2002)

11.24.2.4. Lectura en Zigzag

Además del primer coeficiente, que representa el brillo (DC), los 63 coeficientes restantes que se refieren a la crominancia (AC) se leen de manera diagonal, organizándolos en una matriz. Este proceso de lectura en zigzag se utiliza para transformar el flujo de datos en pasos posteriores de la compresión.

11.24.2.5. Codificación Longitud de Ejecución (RLC)

La codificación Longitud de Ejecución o Run Length Coding (RLC) se encarga de representar el número de veces que aparece un coeficiente, considerando los ceros y los valores distintos de cero. Esta técnica de codificación es especialmente efectiva en la representación de secuencias de valores repetitivos o con muchos ceros, lo que es común en imágenes. (Miller, 2002)

11.24.2.6. Codificación Entrópica de Huffman (VLC)

Este último paso se ejecuta cuando los dígitos en el código de longitud corta son estadísticamente significativos. Aquí, se utiliza la codificación entrópica de Huffman, que es una técnica que asigna códigos de longitud variable para representar de manera eficiente los coeficientes en función de su probabilidad de aparición. Esta etapa final es fundamental para la compresión efectiva de datos de imagen, ya que se centra en minimizar la longitud de los códigos para los coeficientes más comunes, lo que contribuye a una reducción significativa del tamaño del archivo de imagen resultante. (Pierce & Michael Noll, 1995)

CAPÍTULO 12

SEÑALES DIGITALES APLICACIONES

Digital Signals Applications

Resumen

Las señales digitales son representaciones discretas de información y tienen numerosas aplicaciones en diversas áreas. En el contexto de las comunicaciones inalámbricas, el espectro electromagnético juega un papel crucial, y se utilizan diferentes bandas para distintos propósitos. Las Industrial, Scientific, and Medical (ISM)o bandas ISM son frecuencias "no licenciadas" ampliamente utilizadas en dispositivos de uso cotidiano, como Bluetooth y Wi-Fi. Por otro lado, las bandas de frecuencia dedicada se asignan específicamente a aplicaciones particulares. Las técnicas de acceso múltiple son esenciales para compartir el espectro entre múltiples usuarios. Las redes inalámbricas, como Wi-Fi y 4G/5G, utilizan estas técnicas para permitir la conexión de numerosos dispositivos de manera simultánea. La multiplexación por división de frecuencias ortogonales en inglés orthogonal frequency division multiplexin (OFDM) es una técnica ampliamente utilizada para transmitir datos de manera eficiente, especialmente en entornos con reflejos múltiples (multipath). OFDM permite dividir el ancho de banda en múltiples subportadoras, lo que mejora la eficiencia espectral y la tolerancia a interferencias.

Palabras claves: ISM, OFDM

Abstract

Digital signals are discrete representations of information and have numerous applications in various fields. In the context of wireless communications, the electromagnetic spectrum plays a crucial role, and different bands are used for different purposes. The ISM (Industrial, Scientific & Medical) bands are "unlicensed" frequencies widely used in everyday devices, such as Bluetooth and Wi-Fi. On the other hand, dedicated frequency bands are specifically assigned to applications.

Multiple access techniques are essential for sharing the spectrum among multiple users. Wireless networks, like Wi-Fi and 4G/5G, employ these techniques to enable the connection of numerous devices simultaneously.

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) is a widely used technique for efficient data transmission, especially in environments with multiple reflections (multipath). OFDM allows dividing the bandwidth into multiple subcarriers, which enhances spectral efficiency and interference tolerance.

Keywords: ISM, OFDM.

12.1. El Espectro Electromagnético

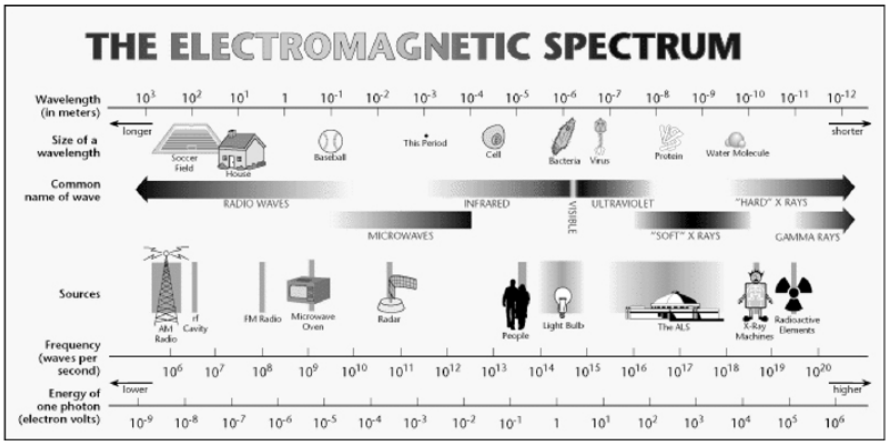


Fig. 184. El espectro electromagnético

El espectro electromagnético es la distribución de todas las ondas electromagnéticas según su frecuencia o longitud de onda. Abarca desde las ondas de radio (baja frecuencia, larga longitud de onda) hasta los rayos gamma (alta frecuencia, corta longitud de onda). Se divide en regiones como radio, microondas, infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos X y rayos gamma. Es fundamental en telecomunicaciones, astronomía, medicina y otras aplicaciones tecnológicas.

12.1.1. bandas ISM (Industrial, Scientific & Medical)"No Licenciadas"

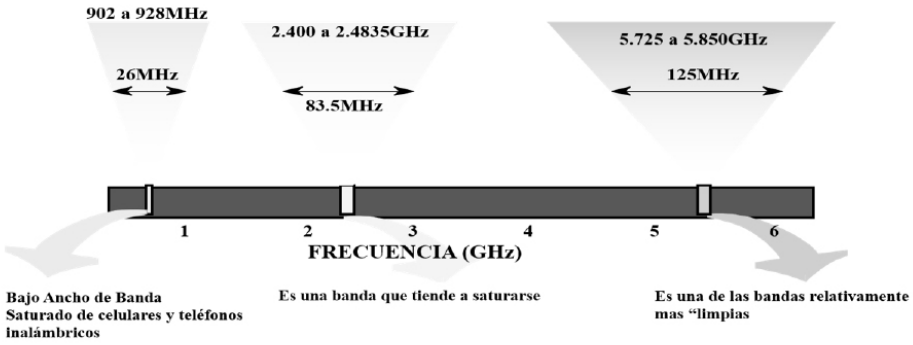


Fig. 185. El espectro electromagnético

12.1.2. Banda (Frecuencia) dedicada

Una banda (o frecuencia) dedicada se asemeja a la transmisión de una estación de radio, donde tanto el transmisor como el receptor deben estar afinados con gran precisión a una frecuencia específica. Este tipo de transmisión no se basa en una línea de visión directa, ya que las ondas de radio pueden reflejarse en su trayecto, lo que en ocasiones puede ocasionar efectos no deseados como el "fantasma" en las señales de televisión (TV ghosting). Además, la emisión en una banda dedicada suele estar regulada por las autoridades para garantizar un uso eficiente y ordenado del espectro electromagnético. (Tanenbaum, 2003; Stallings, 2004)

12.2. Técnicas de Acceso Múltiple

Las Técnicas de Acceso Múltiple permiten que varios usuarios compartan un mismo medio de transmisión sin interferencias significativas. Se utilizan en telecomunicaciones para optimizar el uso del espectro y mejorar la eficiencia de las redes.

Principales Técnicas:

1. FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia) → Asigna a cada usuario una banda de frecuencia distinta.
2. TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo) → Divide el tiempo en ranuras y asigna cada una a un usuario.
3. CDMA (Acceso Múltiple por División de Código) → Usa códigos únicos para separar las señales de distintos usuarios en el mismo canal.
4. OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal) → Variante de FDMA que usa subportadoras ortogonales para mejorar la eficiencia espectral.
5. SDMA (Acceso Múltiple por División Espacial) → Usa antenas direccionales para asignar el mismo canal a diferentes usuarios en ubicaciones distintas.

Estas técnicas son clave en redes móviles (2G, 3G, 4G, 5G), Wi-Fi y comunicaciones satelitales.

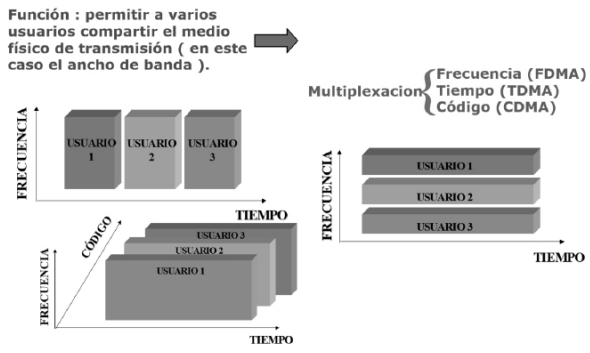


Fig. 186. Técnicas de acceso múltiple

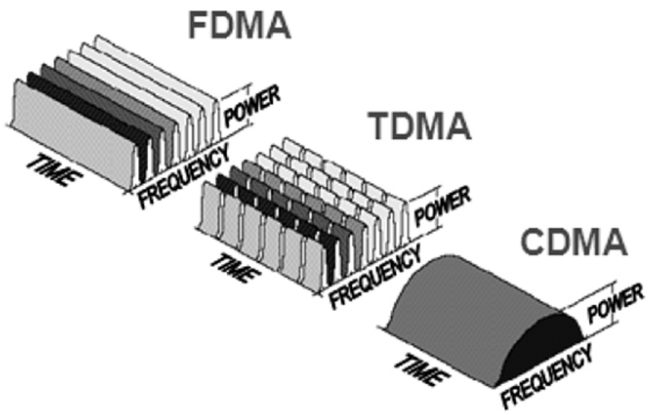


Fig. 187. TDMA, FDMA y CDMA en las Dimensiones Potencia , Frecuencia y Tiempo

12.3. Redes Wireless

Las redes inalámbricas que utilizan radiofrecuencias se pueden clasificar según su capa física, en sistemas de frecuencia dedicados y de espectro ensanchado o sistemas distribuidos (por ejemplo, elegidos por IEEE 802.11). Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) se considera una técnica de multiplexación por división de frecuencia ortogonal, que se tiene como una nueva técnica de acceso a los medios. (Tanenbaum, 2003; Stallings, 2004)

12.3.1. Introducción a Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM)

Introducción a Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

El **Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)** es una técnica de modulación y multiplexación que divide un canal de comunicación en múltiples subportadoras ortogonales, permitiendo la transmisión simultánea de datos a través de varias frecuencias.

Principales características de OFDM:

- Uso de subportadoras ortogonales → Evita la interferencia entre ellas y mejora la eficiencia espectral.
- Resistencia a interferencias y desvanecimiento → Reduce los efectos de la dispersión en entornos multipercurso.
- Mayor eficiencia en el uso del espectro → Permite altas tasas de transmisión en anchos de banda limitados.
- Uso de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) → Facilita la implementación digital y reduce la complejidad del sistema.

Aplicaciones de OFDM:

OFDM se utiliza en diversas tecnologías de comunicación como **Wi-Fi (802.11a/g/n/ac/ax), LTE, 5G, DVB-T, ADSL y redes de fibra óptica**, mejorando la velocidad y la calidad de la transmisión de datos.

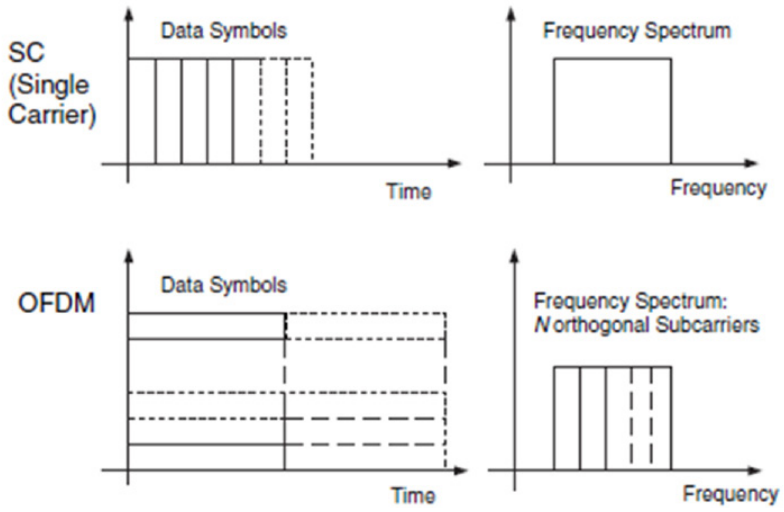


Fig. 188. Representación Tiempo y frecuencia de SC y OFDM. Símbolos de datos se transmiten simultáneamente en N subportadoras ortogonales

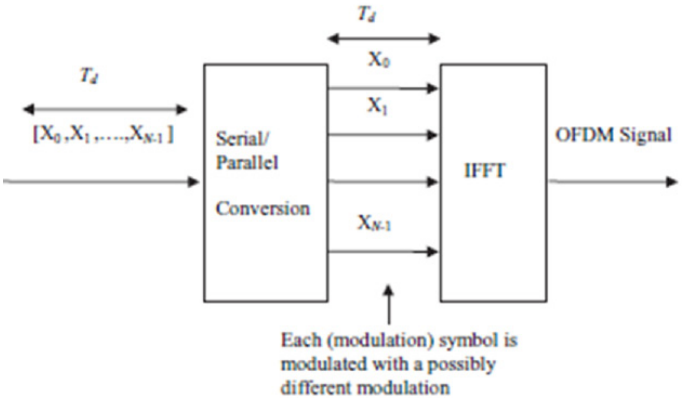


Fig. 189. Generación de una señal OFDM (simplificada)

12.3.2. Espectro de los Subcanales Solapados

Espectro de los Subcanales Solapados en OFDM

En **OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)**, el espectro de cada subcanal se solapa parcialmente con los demás, pero gracias a la **ortogonalidad** de las subportadoras, no hay interferencia entre ellas. El solapamiento de los subcanales en OFDM permite una transmisión más eficiente sin interferencias, lo que lo hace ideal para comunicaciones de alta velocidad en entornos inalámbricos y de banda ancha.

Características clave:

1. **Uso de subportadoras ortogonales** → Cada subportadora es una onda sinusoidal con una frecuencia específica, espaciada de manera que su energía en los puntos centrales de las otras subportadoras sea cero.
2. **Superposición de espectros** → A diferencia de los sistemas FDMA tradicionales, en OFDM las subportadoras se superponen, maximizando la eficiencia espectral sin causar interferencia.

3. **Transformada Rápida de Fourier (FFT)** → Facilita la generación y recepción de las señales, asegurando la ortogonalidad de los subcanales.
4. **Reducción del ancho de banda desperdiciado** → La superposición de los espectros permite aprovechar mejor el canal, aumentando la capacidad de transmisión.

Ventajas:

- Mayor eficiencia espectral en comparación con FDMA.
- Mayor resistencia a la interferencia y al desvanecimiento selectivo.
- Optimización del ancho de banda en sistemas como LTE, Wi-Fi y 5G.

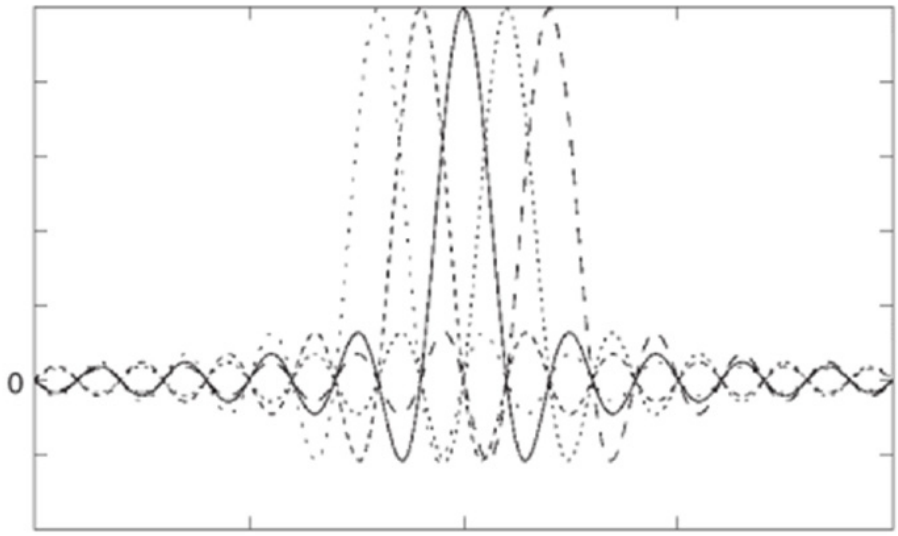


Fig. 190. TDMA, FDMA y CDMA en las dimensiones Potencia , Frecuencia y Tiempo

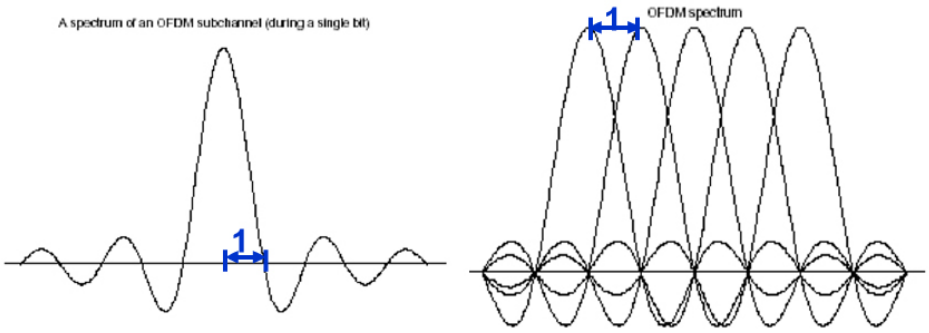


Fig. 191. Espectro de OFDM

12.4. FDM vs OFDM. Comparación

FDM (Frequency Division Multiplexing) y OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) son técnicas de multiplexación que permiten la transmisión simultánea de múltiples señales en un mismo canal, pero difieren en su eficiencia espectral y resistencia a interferencias. **OFDM es una evolución de FDM**, optimizando la eficiencia espectral al permitir que los subcanales se superpongan sin interferencia, lo que mejora la resistencia a la interferencia y la transmisión de datos en entornos de alta velocidad.

Característica	FDM (Multiplexación por División de Frecuencia)	OFDM (Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal)
Principio	Asigna una banda de frecuencia separada a cada canal o usuario.	Divide el canal en múltiples subportadoras ortogonales que se solapan.
Uso del espectro	Necesita bandas de guarda para evitar interferencias.	Optimiza el uso del espectro al superponer subportadoras sin interferencia.

Característica	FDM (Multiplexación por División de Frecuencia)	OFDM (Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal)
Eficiencia espectral	Baja, debido a las bandas de guarda.	Alta, ya que las subportadoras están ortogonalmente espaciadas.
Interferencia entre canales	Posible interferencia si las bandas de guarda no son suficientes.	Mínima, debido a la ortogonalidad de las subportadoras.
Resistencia al desvanecimiento	Sensible a interferencias y desvanecimientos en multipercurso.	Alta resistencia a desvanecimientos y dispersión por multi-trayectoria.
Complejidad	Implementación sencilla con filtros por canal.	Requiere procesamiento digital con FFT/IFFT.
Ejemplos de aplicación	Radiodifusión analógica, telefonía tradicional, redes satelitales.	Wi-Fi, LTE, 5G, DVB-T, ADSL, comunicaciones modernas.

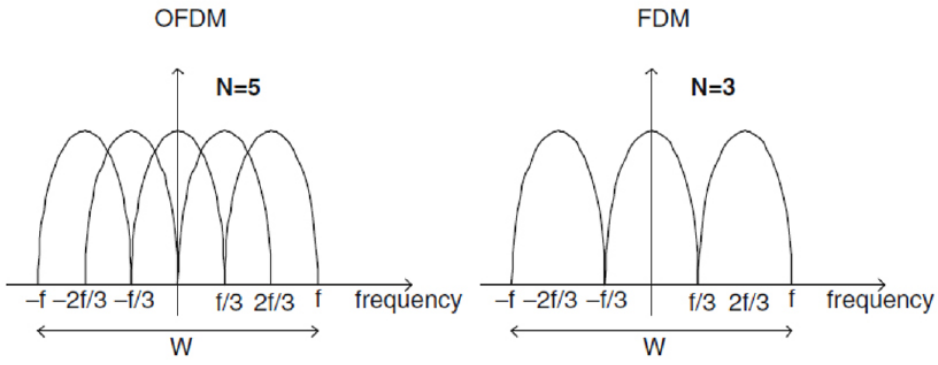


Fig. 192. FDM vs OFDM

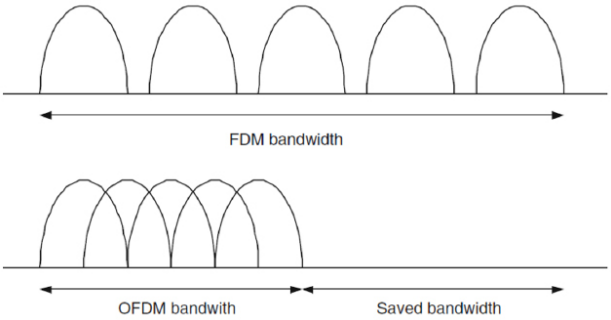


Fig. 193. Ancho de Banda FDM vs OFDM

12.4.1. Ventajas en Multipath

El Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) presenta ventajas notables en entornos multipath (múltiples trayectorias) en comparación con Acceso Múltiple por División de Código (CDMA). En el caso de OFDMA, se beneficia de múltiples trayectorias, ya que utiliza eficazmente los recursos espectrales para evitar el desvanecimiento. Por otro lado, CDMA puede enfrentar problemas de interferencias. OFDMA aborda este desafío seleccionando subportadoras con una degradación mínima del canal, lo que evita la pérdida de recursos del sistema, como potencia o caudal. Esto se traduce en una alta capacidad del sistema, lo que lo convierte en una opción muy eficiente en términos de recursos en entornos multipath. (Pinto García, 2015)

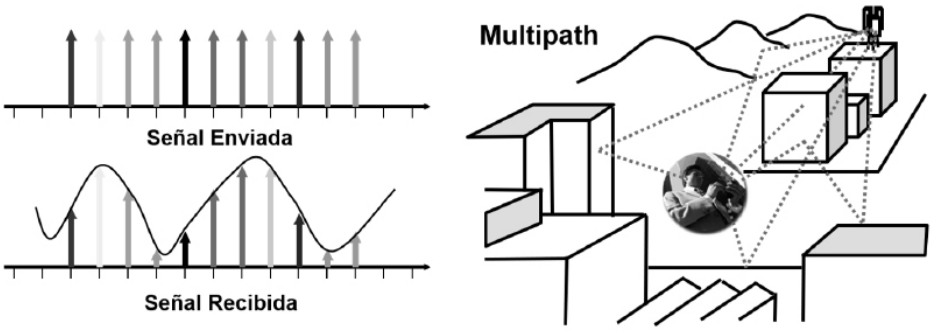


Fig. 194. Ventajas en Multipath

12.5. Eficiencia Espectral

La eficiencia es un aspecto crítico en los servicios de datos, especialmente debido a la escasez o alta demanda de espectro. La eficiencia se convierte en un factor determinante para el uso exitoso del espectro y el modelo de negocio asociado. En este contexto, los reguladores desempeñan un papel fundamental al reciclar el espectro de sistemas que no utilizan eficientemente los recursos disponibles. Esto es esencial para garantizar un uso óptimo del espectro y satisfacer la creciente demanda de servicios de datos de manera efectiva. (Sundberg, 1986)

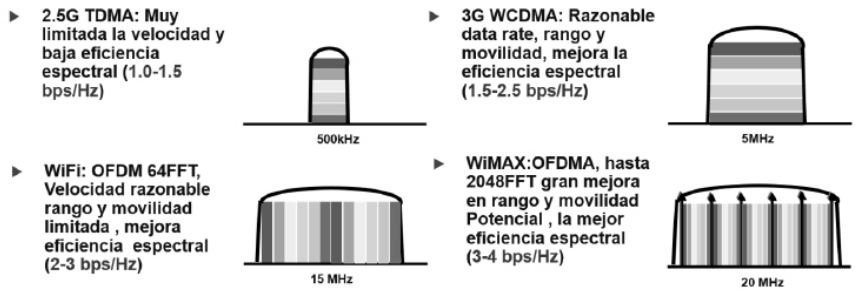


Fig. 195. Eficiencia Espectral

CDMA es esencialmente una técnica de espectro ensanchado que permite a varios usuarios acceder al mismo canal multiplexando sus transmisiones en el espacio de código (Carlson, 2007).

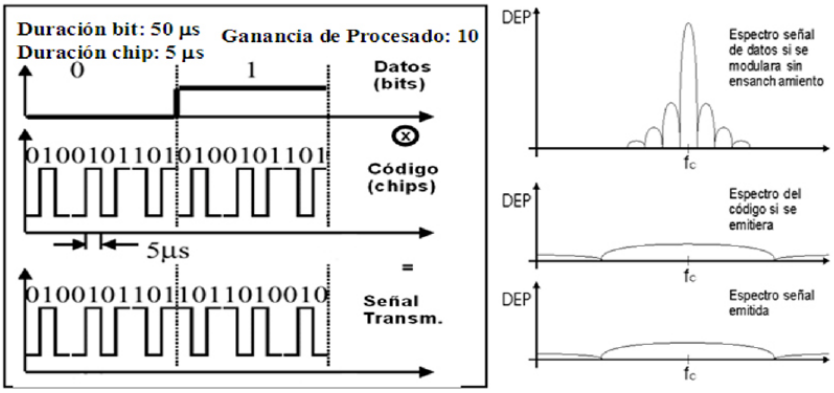


Fig. 196. Ejemplo CDMA

12.6. FDM convencional

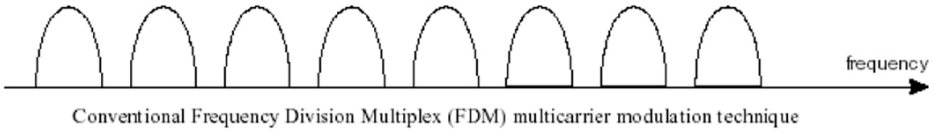


Fig. 197. FDM convencional

Este concepto se asemeja al de Discrete Multi-Tone (DMT), donde se utilizan subcanales que no se superponen y son fáciles de ecualizar. En ambos casos, se busca maximizar la eficiencia y la calidad de la transmisión dividiendo el canal en componentes más manejables y separados que se adaptan mejor a las condiciones de transmisión. (Sundberg, 1986)

12.7. OFDM

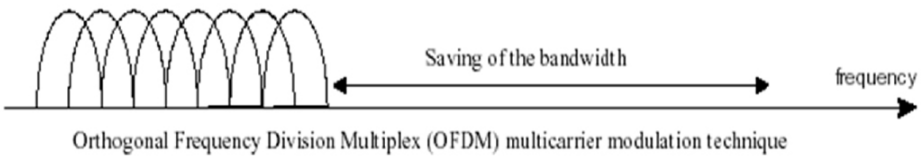


Fig. 198. Comparación entre la utilización del ancho de banda para FDM *y* OFDM

La utilización de portadoras ortogonales se da en subcanales superpuestos, y se emplea un ID estático. Este enfoque brinda diversas ventajas que se traducen en un ahorro de ancho de banda y la capacidad de lograr altas velocidades de transmisión. La ortogonalidad de las portadoras en subcanales superpuestos es fundamental para el rendimiento eficiente del sistema. (Sundberg, 1986)

12.7.1. Uso de OFDM en 802.11 para WLAN

Standard	Maximum Bit Rate	Fallback Rates	Frequency Band	Radio Technique
802.11	2 Mbps	1 Mbps	2.4 GHz	FHSS or DSSS
802.11b	11 Mbps	5.5 Mbps 2 Mbps 1 Mbps	2.4 GHz	DSSS
802.11a	54 Mbps	48 Mbps 36 Mbps 24 Mbps 18 Mbps 12 Mbps 9 Mbps 6 Mbps	5 GHz	OFDM
802.11g	54 Mbps	Same as 802.11a	2.4 GHz	OFDM

Fig. 199. Tabla de estándares con las normas b, a y g.

12.7.2. Aplicaciones de OFDM

OFDM se utiliza en una variedad de aplicaciones, incluyendo normas IEEE 802.11a para WLAN en la banda de 5 GHz con velocidades de 6 a 54 Mbps. Esta tecnología se emplea tanto en soluciones internas como externas. Además, se utiliza en la comunicación inalámbrica de banda ancha para servicios multimedia con un ancho de banda de 105/28 MHz y una velocidad de 72/192 Mbps en la banda de 35 GHz. Otra aplicación importante es el Power Line Communication (PLC), y en la Televisión Digital. (Romero et al., 2016)

Conclusiones

las técnicas de modulación, como OFDM, ofrecen soluciones más avanzadas y resistentes al ruido e interferencias no deseadas. Estas tecnologías aprovechan al máximo el potencial de los medios de comunicación, permitiendo la coexistencia de múltiples señales en el espectro de radio y brindando un rendimiento superior en diversas aplicaciones. (Buehler & Lunden, 1966)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bibliographic References

Abasi, A. K., Makhadmeh, S. N., & Al-Betar, M. A. (2023). Lemurs Optimizer: A New Metaheuristic Algorithm for Global Optimization. machine learning faculty publications, Vol. 304.

Abramson, N. (1986). Teoría de la Información y Codificación (6 ed.). Madrid, España: Paraninfo.

Alvin, A. L. (1965). Designing the RFI Shielded Package (Vol. 24). Chicago: Weson.

Armstrong, E. (1984). A Method of Reducing Disturbances in Radio Signaling by a System of Frequency Modulation. Proceedings of IEEE, 72(8), 1042-1062.

Bhooshan, S. (2022). Fundamentals of Analogue and Digital Communication Systems. Singapore: Springer Nature.

Blake, R. (2006). Sistemas Electrónicos de Comunicaciones (3 ed.). Mexico DF: Thompson.

Buchman, A. S. (1962). Noise Control in Low Level Data Systems (Vol. 6). USA.

Buehler, W. E., & Lunden, C. D. (1966). Signature of Man-made High-frequency Radio Noise (Vol. 8). USA: IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility.

Carlson, A. B. (2007). Sistemas de Comunicaciones. Mexico DF: McGraw-Hill / Interamericana de México.

Cook, D. V. (1967). RFI Suppression, Part I (Vol. 11). Electromechanic Design.

Couch, L. W. (2013). Sistemas de Comunicaciones Digitales y Analogicas. New York: Pearson.

Danizio, P. E. (2019). Sistemas de comunicaciones. Serie Ingeniería, SISTEMAS Y TEORIA nº 1. Cordoba, Argentina: Editorial Cientifica Universitaria de Cordoba.

Danizio, P. E. (2020). Teoría de las comunicaciones. Serie Ingeniería, SISTEMAS Y TEORIA nº 3. Cordoba, Argentina: Editorial Cientifica Universitaria de Cordoba.

Delavernhe, F., Rossi, A., & Sevaux, M. (2023). An online method for robust target tracking using a wireless sensor network. Expert Syst Appl, 230:120549.

Enrique, H. (2004). Comunicaciones II: Comunicación Digital y Ruido. Mexico DF: Limusa Noriega.

Faraz Ul Abrar, M., & Michelusi, N. (2023). Analog-digital Scheduling for Federated Learning: A Communication-Efficient Approach. Arxiv.

Feher, K. (2004). Digital Comunications, Microwave Applications. Chicago: Prentice-Hall.

Feng, S. (2023). VIMOT: a tightly coupled estimator for stereo visual-inertial navigation and multiobject tracking. IEEE Trans Instrum Meas, 72: 1-14.

Gibson, J. (2023). Amplitude Modulation. In: Analog Communications. Synthesis Lectures on Communications. Springer, Cham.

Haykin, S. (2005). Sistemas de Comunicación. Mexico DF: Limusa Wiley.

Hosseinalipour, S., Azam, S. S., Brinton, C. G., Michelusi, N., Aggarwal, V., Love, D. J., & Dai, H. (2022). Multi-stage hybrid federated learning over large-scale d2d-enabled fog networks. IEEE/ACM Trans. on Networking, 1569–1584.

Jiacheng, Y., Weihong, X., Zhaohui, Y., Xiaohu, Y., Mehdi, B., & H.

Vincent, P. (2024). Digital versus Analog Transmissions for Federated Learning over Wireless Networks. ArXiv, abs/2402.09657.

Jing, S., & Xiao, C. (2022). Federated learning via over-the-air computation with statistical channel state information. IEEE Trans. on Wireless Comms., 9351–9365.

Kokhanov, A. &. (2023). HARTLEY AMPLITUDE MODULATION. Sworld-Us Conference proceedings, 16-20.

Kumar, S., Singh, A., Benslimane, A., Chithaluru, P., Albahar, M. A., Rathore, R. S., & Álvarez, R. M. (2023). An optimized intelligent computational security model for interconnected blockchain-IoT system & cities. Ad Hoc Netw, 151:103299.

L., C. R. (1966). The Rationalization of United States Overseas Communications an A Its Potential Impact on Electromagnetic Compatibility (Vol. 8). USA: lEEE Trans. Electromagnetic Compatibility.

Lathi, B. P. (2004). Introducción a la teoría y sistemas de comunicación. Mexico DF: Limusa Wiley.

Lee, S. H., Cheng, C. H., Lin, C. C., & Huang, Y. F. (2023). PSO-based target localization and tracking in wireless sensor networks. Electronics, 12(4): 905.

Lim, W. Y., Luong, N. C., Hoang, D. T., Jiao, Y., Liang, Y. C., & Yang, Q. (2019). Federated learning in mobile edge networks: A comprehensive survey. IEEE Comms. Surveys & Tutorials, 2031–2063.

Mahdi, A., Shishehgarkhaneh, M. B., Basiri, M., & Moehler, R. C. (2023). Squid Game Optimizer (SGO): a novel metaheuristic algorithm. Scientific Reports, Article number: 5373.

Medina Delgado, B., Gómez Rojas, J., & Camargo Ariza, L. L. (2017). Telecomunicación Analógica: Principios de simulación y tratamiento de señal. . Santa Marta, Colombia.: Universidad del Magdalena.

Menso, E. J. (2020). Medios de Enlace : Un Enfoque Práctico (COMUNICACIÓN TELECOMUNICACIÓN | SISTEMAS Y TEORIA nº 9). Cordoba, Argentina: Editorial Cientifica Universitaria de Cordoba.

Mikolajick, T. e. (2021). 20 years of reconfigurable field-effect transistors: from concepts to future applications. Solid State Electron, 186, 108036.

Miller, G. (2002). Modern Electronic Communication (7 ed.). Toledo, Ohio, USA: Prentice Hall.

Moparthi, N., Krishna, B., Chithaluru, P., Morarjee, K., & Kumar, M. (2023). An improved energy-efficient cloud-optimized load-balancing for IoT frameworks. Heliyon, 9(11): 1-13.

Mulaosmanovic, H. e. (2020). Frequency mixing with HFO2-based ferroelectric transistors. ACS Appl. Mater. Interfaces 12, 44919–44925.

Pérez Santacruz, J. (2022). Analog Radio-over-Fiber for 5G/6G Millimeter-Wave Communications. Eindhoven: Eindhoven University of Technology.

Pierce, J. R., & Michael Noll, A. (1995). Señales: la ciencia de las telecomunicaciones. Barcelona: Editorial Reverté.

Pinto García, R. A. (2015). Fundamentos de sistemas de comunicación analógicas. Santa Fe de Bogota: Universidad Piloto de Colombia.

Proakis, J. G., & Salehi, M. (2002). Communications Systems Engineering. Boston: Prentice Hall.

Ramirez Viáfara, J., Romo Romero, H. A., & Silva Zambrano, M. M. (2020). Telecomunicaciones Digitales. Popayan: Universidad del Cauca.

Rashed, A. (2023). Analog and Digital Communication Systems Lab Manual: A Hands-on Guide using MATLAB. Taif: Taif University.

Romero, H., Contreras Muñoz, J. T., & Aguirre, C. (2016). Introducción a los Sistemas de Comunicaciones Electrónicas: Un enfoque didáctico para las Telecomunicaciones. Barranquilla, Colombia: Amazon Books.

Shannon, C. E. (July and October de 1948). A Mathematical Theory of Communication. The Bell System Technical Journal, 27, 379-423 and 623-656.

Simon, M. M. (2022). Three-to-one analog signal modulation with a single back-bias-controlled reconfigurable transistor. Nature Communications.

Stallings, W. (2004). Comunicaciones y Redes de Computadores (7 ed.). Madrid: Pearson Prentice Hall.

Stremler, F. (2008). Introducción a los Sistemas de Comunicación. Mexico DF: Pearson.

Sundberg, C. W. (April de 1986). Continuous Phase Modulation. IEEE Commun. Mag., 25–38.

Sze, S. M. (2021). Physics of Semiconductor Devices. John wiley & sons.

Tanenbaum, A. S. (2003). Redes de Computadoras (Cuarta Edición ed.). México DF: Pearson Educación, ISBN 970-260-162-2.

Tomasi, W. (2003). Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. Mexico DF: Pearson Educación.

Trojovskỳ, P., & Dehghani, M. (2022). Pelican optimization algorithm: A novel nature-inspired algorithm for engineering applications. Sensors, 22, 855.

Tropena, F. (2006). Introducción al procesamiento y transmisión de datos. Buenos Aires: Librería Alsina.

Umelo, N. H., Noordin, N., R. M., Geok, T. K., & Hashim, F. (2022). Grouping based radio frequency identification anti-collision protocols for dense internet of things application. Int J Elect Comput Eng., 5848-5860.

Varga, D. (2022). Full-Reference Image Quality Assessment Based on an Optimal Linear Combination of Quality Measures Selected by Simulated Annealing. Imaging, 8, 224.

Yadav, A., Ali Albahar, M., Chithaluru, P., & al., e. (2023). Hybridizing artificial intelligence algorithms for forecasting of sediment load with multi-objective optimization. Water, 15(3): 522.

Zhang, D., Sun, G., Zhang, J., Zhang, T., & Yang, P. (2023). Offloading approach for mobile edge computing based on chaotic quantum particle swarm optimization strategy. Ambient Intell Humanized Comput., 14(10): 14333-14347.

Zhao, Z., Xia, J., Fan, L., Lei, X. K., & Nallanathan, A. (2022). System optimization of federated learning networks with a constrained latency. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 1095 - 1100.

Zhong, D. (2022). An ALOHA-based algorithm based on grouping of tag prefixes for industrial internet of things. Secur Commun Netw, 2022(2):1812670.

ACERCA DEL AUTORES

About the Author

Fernando Vélez Varela (*Autor*)
https://orcid.org/0000-0002-4525-0965.

El autor es egresado en Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones en 1997 y con Especialidad en Redes y Servicios Telemáticos en 1999, de la Universidad del Cauca, Magíster en Ingeniería con énfasis en Electrónica en 2017 con la Universidad del Valle. Miembro de Cisco Networking Academy e Instructor CISCO CCNA/CCAI/ITQ. Miembro del Grupo de trabajo de gestión distribuida (DMTF). Profesor, investigador, consultor y formador en el Área de Redes de Datos y Telecomunicaciones, miembro del Grupo de Investigación GITEL, de la Universidad Libre Seccional Cali.

Ciro Antonio Dussán Clavijo (*Coautor*)
ciro.dussan00@usc.edu.co

El coautor es egresado en Administración Informática en 1998 de la Corporación Universitaria de Colombia, con una Especialización en Sistemas Gerenciales de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana Cali en 1999, con una Especialización en Auditoria de Sistemas de la Universidad Antonio Nariño, 2007, Especialista en Informática de la Universidad de Santander en 2013, Magister en Informática de la Universidad de Santander en 2015, miembro de un grupo de investigación COMBA I+D de la Universidad Santiago de Cali, donde también es profesor. Miembro ACM, IEEE. Certificado como Auditor Líder en ISO 27001:2022, Auditor Interno ISO 37001:2016, Cybersecurity ISACA. Consultor y formador en el área de Ciberseguridad.

Yesid Eugenio Santafé Ramón (*Coautor*)

✉ yesid.santafe00@usc.edu.co

El coautor es egresado en Ingeniería Electrónica en 2004, con Especialidad Gestión de Proyectos Informáticos en 2015, Magíster en Controles Industriales en 2019 con la Universidad de Pamplona, miembro de un grupo de investigación GIEIAM de la Universidad Santiago de Cali, donde también es profesor.

PARES EVALUADORES

peer reviewers

Marco Alexis Salcedo Serna
Investigador junior (IJ)
Universidad Nacional de Colombia
https://orcid.org/0000-0003-0444-703X

Alfonso Lucas Rojas Muñoz
Confenalco Valle del Cauca
https://orcid.org/0000-0002-2746-3465

Margareth Mejía Genez
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
https://orcid.org/0000-0002-5142-5813

Nancy Gómez Torres
Universidad del Tolima
https://orcid.org/0000-0002-0111-8778

Luis Alfredo Rodríguez González
Investigador Junior (IJ)
Universidad del Valle
https://orcid.org/0000-0002-1170-8579

Isabel Giraldo Quijano
Observatorio para la Equidad de las Mujeres
https://orcid.org/0009-0001-5872-5675

Distribución y Comercialización /
Distribution and Marketing:

Universidad Santiago de Cali
Publicaciones / Editorial USC
Bloque 7 - Piso 5
Calle 5 No. 62 - 00
Tel: (57+) (2+) 518 3000
Ext. 323 - 324 - 414
editor@usc.edu.co
publica@usc.edu.co
Cali, Valle del Cauca
Colombia

Diagramación / Design & Layout by:

Diego Pablo Guerra Gonzalez
diagramacioneditorialusc@usc.edu.co
Tel: (57+) (2+) 518 3000 Ext. 9131

Este libro se diagramó utilizando fuentes tipográficas Literata en sus respectivas variaciones a 11 puntos en el contenido yBebas Neue, para los capitulares 25 puntos.

Impreso en el mes de Junio.
Editorial Diké S.A.S
Tel: (+57) 301 242 7399
Bogotá - Colombia
2025

Fue publicado por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Santiago de Cali.

Este libro se encarga de desarrollar los conceptos y características en torno de la Información y las Telecomunicaciones, explicando la teoría para comprender el comportamiento de las señales en el medio confinado y multiplex. Se estudia la adaptación de forma estructurada a los avances de la transmisión de voz, datos e imágenes, abordando en base a ejemplos de la vida real y modelos que se usan en establecimientos de los negocios del mundo de diferentes tamaños y complejidad en todo país, dejando al uso de medios y datos, hacia el futuro como una herramienta estratégica para optimizar mejoras introduciendo en el análisis y diseño de la transformación de la información. Este se explica de forma clara y sencilla, y abarca la amplia objetiva, explicativa en un ejemplo metodológico que se emplea en la necesidad experimental que tiene el autor demostrado en su práctica profesional como integrante del uso de las tecnologías durante la trayectoria docente de más de 30 años de trabajo.