

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE
EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA

ANÁLISIS DE LA TÉCNICA DE ESPECTRO EXTENDIDO
(CDMA) EN APLICACIONES DE COMUNICACIONES
SATELITALES CON TRÁFICO VARIABLE

TESIS
MAESTRO EN CIENCIAS

SALVADOR OURAZO ACEVEDO

Ensenada, Baja California, México, diciembre de 1993

Resumen de la tesis de **Salvador Durazo Acevedo** presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en FISICA APLICADA con opción en ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES. Ensenada, Baja California, México. Diciembre de 1993.

**ANALISIS DE LA TECNICA DE ESPECTRO EXTENDIDO (CDMA)
EN APLICACIONES DE COMUNICACIONES SATELITALES
CON TRAFICO VARIABLE**

Resumen aprobado por: _____


M. C. Jorge Enrique Preciado Velasco

Director del Comité de Tesis

En este trabajo de tesis se presenta una descripción general de distintas técnicas de acceso múltiple utilizadas en comunicaciones vía satélite.

Las curvas de comportamiento del canal de comunicación ante tres esquemas de acceso múltiple (TDMA, ALOHA Ranurado y ALOHA Ranurado Adaptable) de estudios ya realizados se toman como punto de referencia.

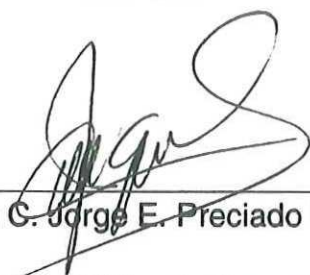
La técnica de acceso múltiple DS/CDMA se analiza con mayor profundidad, así como tres de sus modalidades principales. Se selecciona la técnica DS/CDMA asíncrona para la realización del modelado y simulación del comportamiento del canal de comunicación en términos de capacidad del canal, caudal eficaz y retraso promedio.

Con los resultados de este modelaje y simulación se realiza un análisis comparativo con las técnicas de acceso múltiple tomadas como referencia. De acuerdo con los resultados obtenidos, se considera la factibilidad de aplicar esta técnica en México, se realiza un diseño de una red satelital de comunicaciones con terminales terrenas de pequeña apertura VSAT's operando bajo esta técnica.

Por último se presentan las conclusiones derivadas de los resultados del modelaje y simulación, donde se incluyen algunos puntos de interés para el desarrollo de futuros trabajos relacionados con esta técnica de acceso en comunicaciones satelitales.

**ANALYSIS OF SPREAD SPECTRUM (CDMA) TECHNIQUE
ON VARIABLE TRAFFIC APPLICATIONS FOR SATELLITE
COMMUNICATIONS**

Summary approved by: _____


M. en C. Jorge E. Preciado Velasco

Director Of Thesis Committee

This work present a general description of different multiple access techniques applied to satellite communications.

The communications channel performance graphics for three techniques (TDMA, Slotted ALOHA and Adaptive Slotted ALOHA) are taken into account as reference.

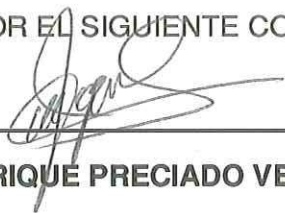
The multiple access technique CDMA is analyzed in their different modalities. Asynchronous DS/CDMA communication system is selected to model and simulate the channel performance based on channel capacity, throughput and mean delay.

From such results, a comparative analysis respect to reference multiple access technique is made. According to conclusions, the feasibility to use this technique in Mexico is summarized, and a satellite network design for Very Small Aperture Terminal is considered using DS/CDMA technique.

Finally, derived of the model and simulation results, the conclusions of this work are presented, which include alternative aspects related for future studies.

TESIS DEFENDIDA POR: SALVADOR DURAZO ACEVEDO

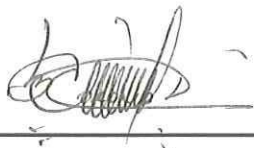
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITE:



M.C. JORGE ENRIQUE PRECIADO VELASCO.- Director del Comité



DR. LEONEL COTA ARIZA.- Miembro del Comité



M.C. MANUEL CORONA DOMINGUEZ.- Miembro del Comité



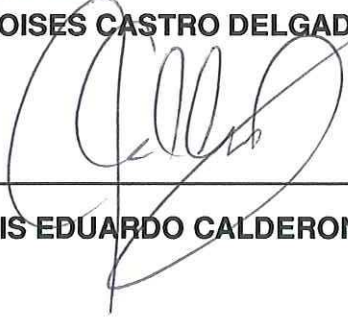
M.C. DAVID COVARRUBIAS ROSALES.- Miembro del Comité



M.C. ROBERTO CONTE GALVAN.- Miembro de Comité



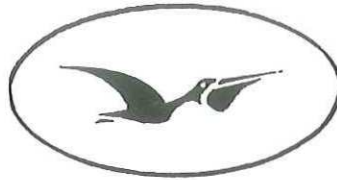
M.C. MOISES CASTRO DELGADO.- Director División de Física Aplicada



DR. LUIS EDUARDO CALDERON AGUILERA.- Director de Estudios de Posgrado

6 DE DICIEMBRE DE 1993

**CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA
Y DE EDUCACION SUPERIOR
DE ENSENADA, B. C.**



CICSE

**DIVISION DE FISICA APLICADA
DEPARTAMENTO DE ELECTRONICA
Y TELECOMUNICACIONES**

**ANALISIS DE LA TECNICA DE ESPECTRO EXTENDIDO (CDMA)
EN APLICACIONES DE COMUNICACIONES SATELITALES
CON TRAFICO VARIABLE**

TESIS

**QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS
NECESARIOS PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS**

PRESENTA

SALVADOR DURAZO ACEVEDO

Ensenada B. C., Diciembre de 1993.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado con amor y cariño:

A mis padres

José Francisco Durazo Gutiérrez

e

Irma María de la Luz Acevedo de Durazo

Quienes han depositado en mi su esfuerzo y confianza, quienes me han mostrado el camino sin obligarme a seguirlo, quienes me han apoyado sin límite ni condiciones, quienes con palabras y actos me han mostrado la sabiduría de su corazón.

A mi esposa

Elizabeth Romero Samaniego

Por ser el apoyo a mis esfuerzos, por alentarme en el alcance de mis metas, por compartir mis penas y alegrías, por ser el complemento a mi persona.

A mis hijos

Irma Elizabeth

y

Salvador

Por ser la chispa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por haberme permitido alcanzar una más de mis metas.

A mi amigo y director de tesis **M. C. Jorge Enrique Preciado Velasco** por su apoyo, consejos e incondicional amistad.

A los miembros de mi comité de Tesis: **M. C. David Covarrubias Rosales, M. C. Roberto Conte Galván, M. C. Manuel Corona Domínguez y Dr. Leonel Cota Araiza** por su apoyo e invaluable aportaciones para que este trabajo culminara en su mejor forma posible.

A mi asesor académico **M. C. Jaime Sánchez García** por sus acertados consejos y apoyo desinteresado.

A mis hermanos **José Luis, Sergio José, Fernando e Irma Luz** por su cariño y apoyo.

A mis compañeros de generación: **Zarina, Ana María, Juan Ramón, Martín Rogelio, Miguel Angel, Jorge Alberto, Julio y Carlos** por compartir sus experiencias.

A mis maestros y personal del **CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y EDUCACION SUPERIOR DE ENSENADA**.

Al **CICESE** por permitirme mejorar mis estudios.

Al **CONACyT** por su apoyo económico para la culminación de mis estudios.

A **México** por ser parte de mis raíces y a su **gente** con quienes tengo un compromiso.

CONTENIDO

Página

I. INTRODUCCION.

I.1. Planteamiento del problema.	1
I.2. Antecedentes.	3
I.3. Objetivo.	4
I.4. Metodología.	5

II. ESQUEMAS DE ACCESO MULTIPLE.

II.1 Introducción.	7
II.1 Acceso Múltiple por División de Frecuencia FDMA.	8
II.2.1. FDM/FM/FDMA.	10
II.2.2. SCPC/FDMA.	11
II.2.3. SCPC/DAMA.	12
II.3. Acceso Múltiple por División de Tiempo TDMA.	14
II.3.1. TDMA Simple.	14
II.3.2. TDMA/DAMA.	20
II.4. ALOHA.	21
II.4.1 ALOHA Puro.	21
II.4.2. ALOHA Ranurado.	24
II.4.3. ALOHA Ranurado Adaptable.	26
II.5. Conclusiones.	28

CONTENIDO (Continuación)

	<u>Página</u>
III. ACCESO MULTIPLE POR DIVISION DE CODIGO CDMA.	
III.1. Introducción.	29
III.2. Campos de aplicación.	30
III.3. Técnicas, códigos y protocolos.	32
III.3.1. Técnicas.	33
III.3.2. Códigos.	35
III.3.3. Protocolos.	38
III.4. CDMA en secuencia directa DS/CDMA.	40
III.4.1. Conceptualización.	40
III.4.2. Enfoque matemático.	42
III.4.3. Potencia en el proceso de recepción.	45
III.5. Otros esquemas.	47
III.5.1. CDMA con saltos en frecuencia FH/CDMA.	47
III.5.2. CDMA con saltos en tiempo TH/CDMA.	50
III.5.3. CDMA con saltos en frecuencia y tiempo FH/TH/CDMA.	53
III.6. Conclusiones.	55

CONTENIDO (Continuación)

	<u>Página</u>
IV. MODELO MATEMATICO.	
IV.1. Comportamiento del canal.	57
IV.1.1. Probabilidad de colisión.	58
IV.1.2. Retraso promedio, Caudal eficaz y Capacidad del canal.	61
IV.1.2.1. Ecuaciones de tasas de transición.	63
IV.2. Eficiencia.	65
IV.3. Interferencia y probabilidad de error.	66
IV.3.1. Probabilidad de error ante interferencia uniforme.	67
IV.3.2. Probabilidad de error ante interferencia pulsada.	69
V. SIMULACION POR PROGRAMA.	
V.1. Parámetros del modelo.	71
V.2. Proceso markoviano de solución.	73
V.3. Secuencia programática.	74
V.4. Resultados y conclusiones.	76
V.4.1. Retraso Promedio (RP).	76
V.4.2. Caudal Eficaz.	81
V.4.3. Estabilidad.	85

INDICE (Continuación)

	<u>Página</u>
VI. DISEÑO DE UNA RED CDMA.	
VI.1. Generalidades.	89
VI.2. Diseño de una terminal terrena.	93
VI.3. Capacidad del sistema.	98
VI.4. Conclusiones.	
VII. CONCLUSIONES.	
VII.1. Problemas enfrentados y soluciones.	100
VII.2. Conclusiones.	101
VII.2.1. Conclusiones de los protocolos de CDMA.	102
VII.2.2. Conclusiones de CDMA respecto a otros esquemas.	102
VII.3. Aportaciones.	104
VII.3. Recomendaciones para posibles trabajos futuros.	105
LITERATURA CITADA	107
GLOSARIO	108
GLOSARIO DE ABREVIATURAS	111

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Asignación de bandas de frecuencia en un esquema FDMA.	9
2	Diagrama de bloques de operación del esquema FDM/FM/FDMA.	11
3	Asignación de frecuencias de un transpondedor satelital utilizando el esquema SCPC/FDMA.	12
4	Espectro de frecuencias del sistema SPADE .	14
5	Transmisión de paquetes en un sistema satelital utilizando el esquema TDMA.	16
6	Diagrama de ranuras de tiempo (canales) en el esquema TDMA.	17
7	Esquema de una supertrama en TDMA.	18
8	Caudal Eficaz vs. Retraso Promedio para el esquema TDMA con una velocidad de transmisión de 64 Kbps y 100 usuarios.	19
9	Estructura de paquetes para el protocolo del sistema ALOHA.	21
10	Operación de la técnica ALOHA puro en transmisión de paquetes. a). Transmisión exitosa. b). Transmisión con colisión.	23
11	Operación de la técnica ALOHA ranurado en transmisión de paquetes. a). Transmisión exitosa. b). Transmisión con colisión.	24

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura		Página
12	Caudal Eficaz vs. Retraso Promedio del esquema ALOHA Ranurado para una velocidad de transmisión de 64 Kbps, longitud de paquete de 1120 bits y un retraso de propagación de 0.27 segundos.	26
13	Caudal Eficaz vs. Retraso Promedio de los esquemas SRUC y ARA en función de distintas longitudes de marcos.	27
14	Acceso múltiple en un sistema de comunicación de radioenlace.	30
15	Trayectorias múltiples en un sistema de comunicación de radioenlace.	31
16	Interferencia en sistemas de comunicación de radioenlace.	32
17	Arreglos de registros de corrimiento para generación de códigos. a). Registro de recorrimiento simple. b). Registro de recorrimiento operado por un polinomio primitivo.	37
18	Generadores de secuencias de la familia Gold. a). Registros de recorrimiento de longitud 9 con periodicidad 511. b). Registros de recorrimiento de longitud 10 con periodicidad 1023.	38
19	Protocolos para paquetización de información en el esquema CDMA.	40
20	Transpondedor satelital disponible para CDMA.	41
21	Multiplicación de código e información en la técnica CDMA. a). $T_b = KT_c$. b). $T_b = 2KT_c$. c). $T_b = KT_c/2$.	42

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura		Página
22	Diagrama a bloques del receptor y transmisor para la técnica CDMA. a). Ensanchamiento de señal por multiplicación de código y datos. b). Ensanchamiento de señal por convolución de señales moduladas.	43
23	Espectro de potencia de recepción. a). Espectro de un código absolutamente ortogonal. b). Espectro de un código quasi-ortogonal. c). Función de lazo de sincronía fina.	46
24	Transpondedor satelital bajo la técnica CDMA con saltos en frecuencia.	48
25	Esquema en bloques de un transmisor FH/CDMA.	49
26	Transpondedor satelital segmentado en ranuras temporales.	51
27	Transpondedor satelital segmentado en tiempo y asignación de código - tiempo para cada usuario del sistema.	52
28	Diagrama en bloques de un transmisor TH/CDMA.	53
29	Transpondedor satelital utilizado bajo la técnica FH/TH/CDMA.	54
30	Diagrama en bloques de un transmisor FH/TH/CDMA.	55
31	Translape de dos paquetes vistos desde un receptor.	59
32	Esquema general de un modelo de Markov en dos dimensiones.	62
33	Distribución de coeficientes en el sistema de ecuaciones simultáneas. Caso específico de un arreglo matricial para $N = 6$ usuarios.	72

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura		Página
34	Diagrama en bloques de la secuencia programática requerida para la obtención de los parámetros RP, CE y CC.	74
35	Retraso promedio contra tráfico normalizado del protocolo base receptor para distintos valores de número de usuarios.	77
36	Retraso promedio contra tráfico normalizado del protocolo común transmisor para distintos valores de longitud relativa de preámbulo y un número de usuarios $N = 100$.	78
37	Retraso promedio contra tráfico normalizado del protocolo receptor transmisor para distintos valores de longitud relativa de preámbulo y un número de usuarios $N = 100$.	79
38	Retraso promedio contra tráfico normalizado del protocolo común transmisor para distintos valores de número de usuarios y longitud relativa de preámbulo $p = 1\%$.	80
39	Retraso promedio contra tráfico normalizado del protocolo receptor transmisor para distintos valores de número de usuarios y longitud relativa de preámbulo $p = 1\%$.	80
40	Caudal eficaz contra tráfico normalizado del protocolo base receptor para distintos valores de número de usuarios.	82
41	Caudal eficaz contra tráfico normalizado del protocolo común transmisor para distintos valores de número de usuarios y longitud relativa de preámbulo $p = 1\%$.	83
42	Caudal eficaz contra tráfico normalizado del protocolo receptor transmisor para distintos valores de número de usuarios y longitud relativa de preámbulo $p = 1\%$.	83

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura		Página
43	Caudal eficaz contra tráfico normalizado del protocolo común transmisor para distintos valores de longitud relativa de preámbulo y número de usuarios $N = 100$.	84
44	Caudal eficaz contra tráfico normalizado del protocolo receptor transmisor para distintos valores de longitud relativa de preámbulo y número de usuarios $N = 100$.	84
45	Características de estabilidad en una gráfica de caudal eficaz contra tráfico normalizado.	86
46	Efectos de multiplicación por secuencia y codificación.	93

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
I Familias Gold y Kasami para una longitud de generador $K=10$.	37
II Parámetros del proceso de solución en las ecuaciones de tráfico para CDMA.	71
III Parámetros del modelo markoviano general de la figura 32.	72
IV Resumen comparativo de los protocolos BR, CT y RT en términos de RP, CE y Estabilidad.	88
V Elementos de diseño de dimensiones de antena de una estación VSAT con el esquema DS/CDMA en banda Ku con modulación BPSK sin codificación y a una probabilidad de error de 10^{-6} .	96
VI Elementos de diseño de dimensiones de antena de una estación VSAT con el esquema DS/CDMA en banda Ku con modulación BPSK sin codificación y a una probabilidad de error de 10^{-3} .	97

ANALISIS DE LA TECNICA ESPECTRO EXTENDIDO (CDMA) EN APLICACIONES DE COMUNICACIONES SATELITALES CON TRAFICO VARIABLE.

I. INTRODUCCION.

I.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

A la fecha, se han desarrollado muchas técnicas y protocolos de acceso en torno a la obtención de la máxima eficiencia de los canales de comunicación. La justificación de estos estudios reside en las limitaciones mismas del medio de transmisión y la saturación del espectro de frecuencia disponible. Para sistemas de comunicación vía satélite, en particular, estas limitaciones se agudizan con el costo tan elevado de fabricación, lanzamiento y puesta en órbita del satélite. Para efficientizar los recursos de ancho de banda y potencia de transmisión de este sistema de comunicación se requiere de un estudio detallado de cada técnica de acceso. Dichos estudios se han desarrollado genéricamente en los siguientes campos:

- Uso de otros intervalos de frecuencia, tales como la onda milimétrica y las longitudes de onda en la región óptica mediante LASER para enlace entre satélites.
- Sistemas de modulación digital de alto orden, con detección invariablemente coherente (4PSK, 8PSK, 16PSK, etcétera).
- Reutilización de frecuencia mediante el empleo de distintas polaridades (horizontal, vertical, y circulares) y haces dirigidos a distintas zonas.

- Perfeccionamiento en el diseño de antenas de haz puntual ultra estables para incrementar la directividad y la ganancia.
- Conmutación a bordo y sistemas SPADE para asignación por demanda en naves espaciales.
- Esquemas de acceso múltiple para enlace entre estaciones terrenas y satélites.

Se han realizado estudios profundos sobre estos temas con resultados altamente positivos. Esto ha incrementado las posibilidades de obtener mayor provecho de los recursos disponibles de acuerdo a la demanda y las necesidades de servicio. Se han logrado avances significativos en la eficientización de recursos satelitales mediante el modelado y la simulación computacional. Sin embargo, las características de los esquemas modelados son muy específicos, teniendo como base de diseño los distintivos particulares de las regiones en que se han generado.

Distintas técnicas de acceso para sistemas de comunicación vía satélite han sido adoptadas por países en desarrollo. Sin embargo, la eficiencia se encuentra en función de factores múltiples (sociales, geográficos, económicos, etcétera) que repercuten en la función costo - complejidad y la satisfacción de las necesidades regionales e internacionales en términos de los servicios proporcionados por el sistema de comunicación.

En México, existen diversas redes de comunicaciones satelitales con igual

diversidad en su técnica de acceso y aplicación, entre las que destaca la red de Terminales de Pequeña Apertura (VSAT's, Very Small Aperture Terminal), la cual ha tenido grán aceptación para aplicación rural y servicios financieros, utilizando principalmente el esquema de Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA, Time Division Multiple Access).

En los últimos años, el estudio de los esquemas de acceso múltiple ha incrementado la versatilidad y flexibilidad de los sistemas, así como la eficiencia de los mismos. La demanda de nuevos servicios y mayores niveles de tráfico con un soporte físico rentable para aplicación de comunicaciones entre comunidades rurales y urbanas, ha originado una nueva visión de tipos de redes satelitales aptas para operar en diversas regiones de México con un bajo costo de mantenimiento y explotación. Surge por tanto la necesidad de realizar un estudio de estas técnicas de acceso que tenga repercusión directa y posible adaptación inmediata en los sistemas de comunicación regionales.

1.2. ANTECEDENTES.

En la década de los 50's, se desarrolló la idea de esparcir la señal de información en todo el ancho de banda disponible como una forma de proteger y codificar la información por razones de seguridad. A esta técnica de codificación se le denominó Espectro Extendido (EE), también conocida como Spread Spectrum (SS). Sin embargo este desarrollo fue más evolutivo que revolucionario, ya que en dicha época no se contaba con la tecnología suficiente para generar sistemas complejos que proporcionaran transmisión y recepción en EE. Los primeros desarrollos fueron de aplicación militar debido a sus propiedades tan

atractivas de difícil detección y baja intermodulación. En las décadas posteriores, la evolución tecnológica en dispositivos de media y alta integración y las velocidades de conmutación hicieron posible el desarrollo pleno de esta técnica. En la actualidad EE se encuentra más limitado por el recurso de ancho de banda que por las limitaciones tecnológicas.

En la década de los 80's, esta técnica inició su desarrollo comercial y se difundió fuertemente toda la metodología asociada. Esto ha sido favorecido por el enriquecimiento de ideas de distintas culturas y de innumerables seguidores que han dado su aportación en base a sus propias necesidades de desarrollo.

Desde un enfoque regional, se han desarrollado diversos trabajos respecto a los tipos de redes de comunicaciones satelitales y sus aplicaciones, dentro de los cuales, se encuentra un estudio comparativo de distintas técnicas de acceso [Corona, 1991], en la cual se contemplan el Acceso Múltiple por División de Frecuencia, sus diversas modalidades y el esquema de Acceso Múltiple por División de Código (CDMA, Code Division Multiple Access) como un marco referencial, así como una simulación de los esquemas TDMA, ALOHA ranurado y ALOHA ranurado adaptable respecto a tráfico para describir el comportamiento del canal de comunicaciones.

I.3. OBJETIVO.

Investigar el comportamiento del protocolo CDMA con espectro extendido para realizar el modelaje y simulación bajo situaciones de tráfico variable en comunicaciones urbanas, rurales y/o móviles de voz, datos e imágenes vía satélite.

I.4. METODOLOGIA.

En el desarrollo del presente, el análisis estará enfocado a la obtención de un modelo práctico de aplicación inmediata de acuerdo a las necesidades existentes a partir de estudios ya realizados por diversos autores. Dicha tarea será realizar las adaptaciones correspondientes a las necesidades regionales de México e implementar su simulación por computadora para inferir su comportamiento. Con esto, se estará en posición de emitir un dictámen técnico de su posible repercusión en sistemas propios, para que se realice o no su implantación.

El presente trabajo está organizado de la siguiente manera:

- Investigación de las distintas técnicas de acceso múltiple en operación bajo diferentes escenarios (Capítulo II).
- Investigación de los trabajos realizados por distintos autores en relación a los parámetros que describen el comportamiento de Espectro Extendido como técnica de acceso y muy particularmente a CDMA (Capítulo III).
- Definición y establecimiento de las bases teóricas del modelo (Capítulo IV).
 - i) Capacidad de canal.
 - ii) Caudal eficaz.
 - iii) Retraso promedio.
 - iv) Eficiencia.
 - v) Probabilidad de error.

- Definición de parámetros para la simulación del modelo matemático, proceso de simulación y resultados obtenidos (Capítulo V).
- Aplicación del esquema CDMA en un sistema de enlace por satélite para una red específica (Capítulo VI).
- Análisis de los resultados obtenidos y conclusiones respectivas, con la formulación de las sugerencias para su posible implantación en un sistema de comunicaciones vía satélite en México (Capítulo VII).

II. ESQUEMAS DE ACCESO MULTIPLE

II.1 INTRODUCCION.

En este capítulo, se proporcionan las características más esenciales de algunos esquemas de acceso múltiple utilizados en sistemas de comunicación vía satélite, así como algunas características de importancia respecto al comportamiento del canal de comunicación ante tres de estos esquemas: Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA, Time Division Múltiple Access), ALOHA Ranurado y ALOHA Ranurado Adaptable, y los cuales se derivan de un trabajo que le precede al presente [Corona, 1991].

La operación, ventajas y desventajas, bondades y limitaciones, son peculiaridades de cada esquema, teniendo cada uno de ellos diversas modalidades las cuales se discutirán en forma generalizada.

Estos esquemas de acceso múltiple son: Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA, Frequency Division Multiple Access), Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA, Time Division Multiple Access), ALOHA y algunos otros que se derivan de arreglos de los anteriormente mencionados. El esquema de Acceso Múltiple por División de Código (CDMA, Code Division Multiple Access), se reserva para capítulos posteriores por ser el punto central del presente trabajo.

Para fines de comunicaciones vía satélite, el canal de comunicación es la atmósfera que actúa como medio de propagación de las señales de radiofrecuencia, y el satélite un repetidor limitado en banda, en el que el objetivo principal es la utilización de este servicio por diversos usuarios. Bajo este

enfoque, las características de potencia y ancho de banda de un satélite pueden ser analizadas como enlaces punto-multipunto de un sistema de comunicación. Sin embargo, se pueden obtener grandes simplificaciones en el estudio de las técnicas de acceso múltiple centrando el interés en el enlace de dos puntos singulares (consideración no válida para un modelo matemático preciso).

II.2 ACCESO MULTIPLE POR DIVISION DE FRECUENCIA FDMA.

Los primeros satélites comerciales puestos en órbita a mediados de la década de los 60's emplearon FDMA como sistema de acceso y su utilización se difundió fuertemente. En la actualidad, la mayoría de los satélites aún operan bajo variantes de esta técnica.

FDMA consiste en segmentar en ranuras de frecuencia el ancho total de banda de un canal satelital (transpondedor) para asignar cada una de estas ranuras a cada nodo (estación) de la red.

FDMA es una técnica de acceso muy versátil en función del número de portadoras de transmisión y el ancho de banda. Una estación puede hacer uso de su portadora (frecuencia asignada) ya sea como portadora única, donde todos los datos son multicanalizados a los distintos receptores o bien, utilizar subportadoras individuales para cada canal de voz (SCPC, Single Channel Per Carrier). Las desventajas primordiales de FDMA son la posibilidad de intermodulación y la supresión de señales causadas por las no linealidades de los amplificadores, filtros y transpondedor satelital, además de desperdiciar una porción del recurso espectral por la separación entre canales (bandas de guardia).

Para ilustrar la operación básica de FDMA se considerará la figura 1, en la que se han asignado n bandas de frecuencia a igual número de nodos en una red operando en un transpondedor satelital con un ancho de banda BW [Spilker, 1977]. Las bandas asignadas no precisan ser homogéneas, sin embargo, un caso típico es la igualdad uniforme en estas dimensiones. Las asignaciones pueden modificarse de acuerdo a la demanda y tráfico. Cada estación conoce en todo momento la portadora disponible para transmisión y la respectiva para recepción. Cada estación es responsable de la utilización que da al espectro de frecuencias que se le ha asignado. Sin embargo, debe existir cierta normalización en las potencias de transmisión para combatir la interferencia entre canales vecinos, así como un control de operación del satélite para minimizar los efectos de las no linealidades del transpondedor.



Figura 1. Asignación de bandas de frecuencia en un esquema FDMA.

En un sistema FDMA, las bandas de guardia juegan un papel importante en la eliminación de los productos de intermodulación; las dimensiones de estas bandas de guardia dependen de los residuos laterales de cada señal transmitida y los pequeños barridos de frecuencia (inestabilidad) en la operación de los osciladores locales que proveen la portadora. La necesidad de incluir estas bandas en la segmentación del espectro producen una menor eficiencia de utilización.

En FDMA, todas las portadoras individuales de cada estación terrena se reciben en forma simultánea por el satélite, el cual se encarga de filtrar, amplificar y retransmitir el conjunto de señales hacia todas las estaciones terrenas. Cada estación terrena receptora posee un filtro selectivo para su canal de recepción, el cual elimina las señales que no están destinadas a dicha estación. La señal recibida es demodulada y finalmente se demulticanaliza.

Pueden distinguirse dos modos generales de operación para esta técnica, que son: Transmisión por Portadoras Múltiples, en la cual la estación es responsable de multicanalizar las señales en frecuencia (FDM, Frequency Division Multiplex), posteriormente se modula en frecuencia para su transmisión, y, Transmisión de Portadora con Canal Unico, en la cual se transmiten canales individualmente modulados. Estas dos técnicas generales se describen con brevedad, referenciando como FDM/FM/FDMA a la primera, y como SCPC/FDMA a la segunda.

II.2.1 FDM/FM/FDMA

En este esquema, la estación terrena administra el servicio de comunicación para varios usuarios, cuyas transmisiones son multicanalizadas en frecuencia (FDM, Frequency Division Multiplex) y enrutados a un canal de transmisión de grupo, donde la resultante total es modulada con una portadora intermedia (FM, Frecuencia Modulada) [Spilker, 1977]. Esta señal modulada es transportada a una frecuencia superior de radio preasignada a la estación de acuerdo a su banda de operación. La transmisión se realiza utilizando amplificadores de potencia. La señal más la interferencia es recibida por el

satélite, el cual filtra, amplifica y retransmite la señal.

Una estación terrena en modo de recepción, es capaz de registrar la totalidad del tráfico cursado; sin embargo, la señal entrante es filtrada y amplificada; las portadoras no deseadas se eliminan. En recepción, el proceso se presenta de manera inversa al proceso de transmisión. La señal entrante es amplificada y transportada a una frecuencia intermedia. Un filtro bloquea las señales no deseadas y/o no destinadas a esta estación, permitiendo el paso solo a la portadora que le ha sido asignada para recepción. La señal se demodula y un circuito demulticanalizador separa las portadoras individuales. La figura 2 muestra la operación en bloques de este esquema.

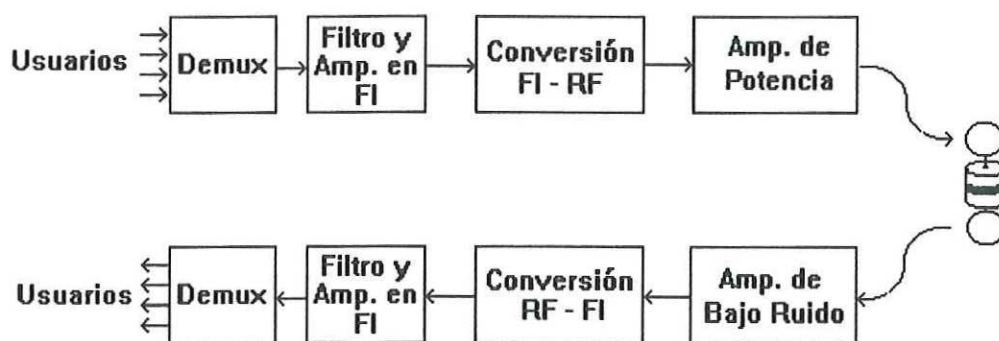


Figura 2. Diagrama de bloques de operación del esquema FDM/FM/FDMA.

II.2.2 SCPC/FDMA.

En la figura 3 se esquematiza el concepto de Canal Único Por Portadora, SCPC, en el cual el ancho total del transpondedor satelital es subdividido en segmentos de frecuencia de forma tal que a cada canal individual en banda base le corresponde una asignación en el transpondedor [Spilker, 1977]. La señal a transmitir es modulada y multicanalizada.

SCPC tiene fuertes limitantes en potencia debido al uso de múltiples portadoras, además de las inherentes desventajas de ruido, atenuación e intermodulación ocasionadas por el manejo de frecuencias. Sin embargo, posee una gran capacidad para compartir los recursos de ancho de banda en forma económica y sencilla. Una modalidad más ampliamente utilizada de SCPC es la descrita a continuación.

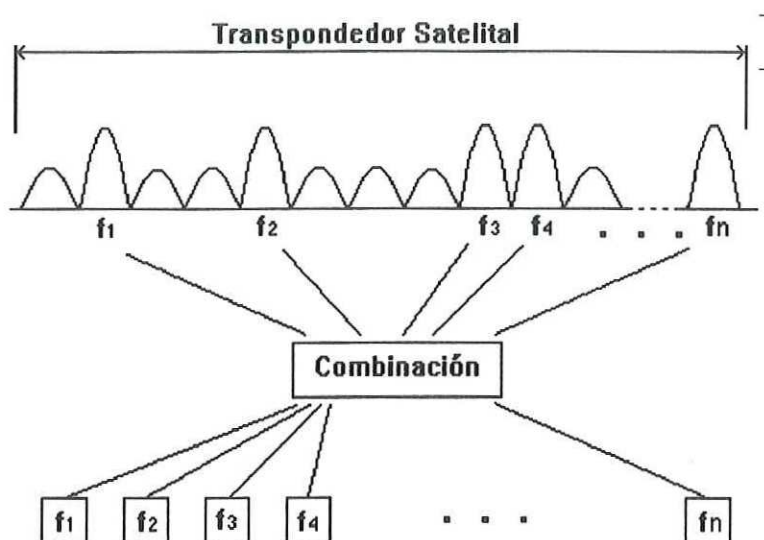


Figura 3. Asignación de frecuencias de un transpondedor satelital utilizando el esquema SCPC/FDMA.

II.2.3 SCPC/DAMA.

El acceso múltiple de canal único por portadora con asignación por demanda (SCPC/DAMA, Single Channel Per Carrier / Demand Assign Multiple Access) es un esquema que hace más eficiente el uso del recurso satelital, ya que la asignación de los segmentos de banda para cada estación terrena es dinámica [Ha, 1986], así como la multicanalización de sus usuarios. SCPC/DAMA es una técnica de acceso digital en la cual los datos son la información de los

usuarios de canales de voz digital procesada individualmente.

En esta técnica, el centro de transmisión es responsable de efectuar la petición a un centro maestro para utilización de un segmento de frecuencia, la estación maestra responde a dicha petición con la asignación de alguna banda de frecuencia libre a la estación que realiza la solicitud y notifica al resto de estaciones en la red de la ocurrencia de dicha asignación. Esto se realiza a través de un canal común de señalización.

El sistema más ampliamente comercializado en sistemas de comunicación vía satélite dentro de esta modalidad de esquemas de acceso es el Acceso Múltiple Asignado por Demanda con Modulación de Pulsos Codificados en Canal Único Por Portadora (SPADE, SCPC PCM Access Demand Equipment). SPADE utiliza una portadora única de radio-frecuencia por cada 64 Kbps de voz digital, el cual corresponde a un canal único de voz de 4 KHz muestreado a una velocidad de 8000 muestras por segundo y de 8 bits por cada muestra. La figura 4 [Spilker, 1977] describe el espectro de frecuencias del sistema SPADE para un transpondedor de 36 MHz, en el cual se observa un canal de señalización común a todas las estaciones y un total de 800 canales individuales de voz con sus respectivas bandas de guarda; 400 canales para recepción y 400 canales para transmisión.

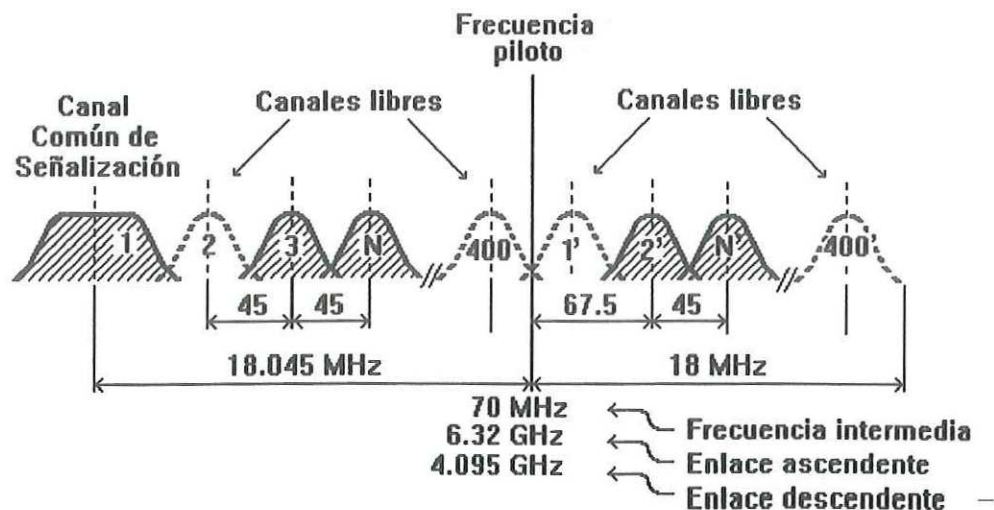


Figura 4. Espectro de frecuencias del sistema SPADE.

El canal común de señalización es utilizado por todas las estaciones para transmitir peticiones y recibir la información del estado que guarda la red utilizando Acceso Múltiple por División de Tiempo, técnica que se ilustrará en el siguiente punto.

II.3 ACCESO MULTIPLE POR DIVISION DE TIEMPO TDMA.

II.3.1 TDMA SIMPLE.

TDMA (Time Division Multiple Access) es una técnica de acceso múltiple en la que se realiza una división del tiempo en pequeños segmentos (ranuras); cada estación tiene acceso a todo el ancho de banda disponible en el satélite en un intervalo de tiempo muy breve que se repite periódicamente a intervalos constantes denominados trama. Una trama o marco, es un ciclo completo de transmisión de todas y cada una de las estaciones que componen la red,

indistintamente de que la estación tenga o no paquetes para transmitir.

A diferencia de FDMA, el fenómeno de intermodulación por canales adyacentes no existe y el amplificador de potencia del satélite puede operar en su punto de saturación [Ha, 1986].

TDMA es una técnica de acceso múltiple invariablemente digital, en la que la sincronía y una estación maestra responsable del control de la red juegan un papel de suma importancia, por lo que las señales analógicas deben ser previamente muestreadas, cuantificadas y codificadas en banda base para su posterior modulación. Para ilustrar la operación de TDMA se considerará la figura 5 [Spilker, 1977]. Típicamente se emplea modulación de fase, aunque bien puede emplearse modulación de frecuencia o modulación por pulsos codificados. Cada una de las estaciones de la red (1, 2, 3, ...) tiene asignada de forma permanente una ranura temporal para transmisión. La estación maestra M es la responsable de indicar al resto de las estaciones mediante una ráfaga de bits de sincronía el principio y el fin de cada trama.

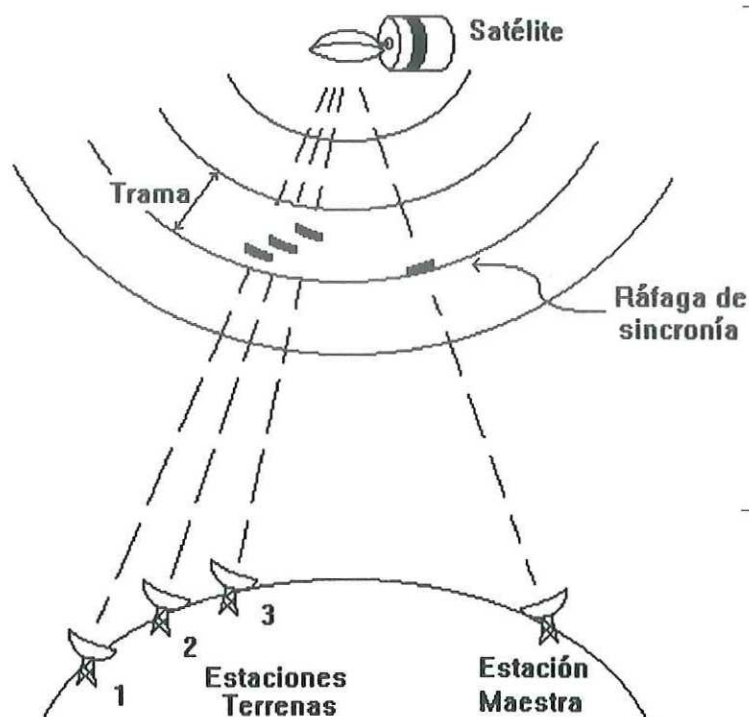


Figura 5. Transmisión de paquetes en un sistema satelital utilizando el esquema TDMA.

En un determinado instante, el satélite recibe la información de solo una estación a diferencia de FDMA, en que las estaciones pueden incidir en el transpondedor satelital en forma simultánea. La figura 6 muestra esta operación en la escala del tiempo, en que el producto de intermodulación es fácilmente evitado con unas pequeñas bandas de guardia por las pequeñas imprecisiones que pudiesen existir por diferencias en las velocidades de transmisión y las distancias de la estación al satélite. Los elementos que ocasionan intermodulación son para TDMA la respuesta de los filtros y la amplitud de los transitorios. En TDMA, las bandas de guardia pueden y deben ser tan pequeñas que consuman menos de un 10% del ancho total disponible en el satélite [Spilker, 1977].



Figura 6. Diagrama de ranuras de tiempo (canales) en el esquema TDMA.

Para ilustrar el proceso de operación y control de un acceso múltiple por división de tiempo se considerará la figura 7, en la cual se representan N tramas denominada "Supertrama" y se desglosa la estructura general de la i-ésima trama.

La trama está compuesta por una secuencia completa de las transmisiones individuales de cada estación terrena más la estación maestra de control. El contenido de la transmisión de la j-ésima estación dentro de una trama son el preámbulo, y la secuencia de paquetes destinados al resto de estaciones terrenas estructurado en un canal PCM seguida de un postámbulo. El preámbulo debe contener un tiempo de guardia para evitar los traslapes entre transmisiones, y una cadena de bits de sincronía, además de la identificación fuente de los datos, orden y estructura de los paquetes. El postámbulo identifica el fin de la ráfaga de transmisión.

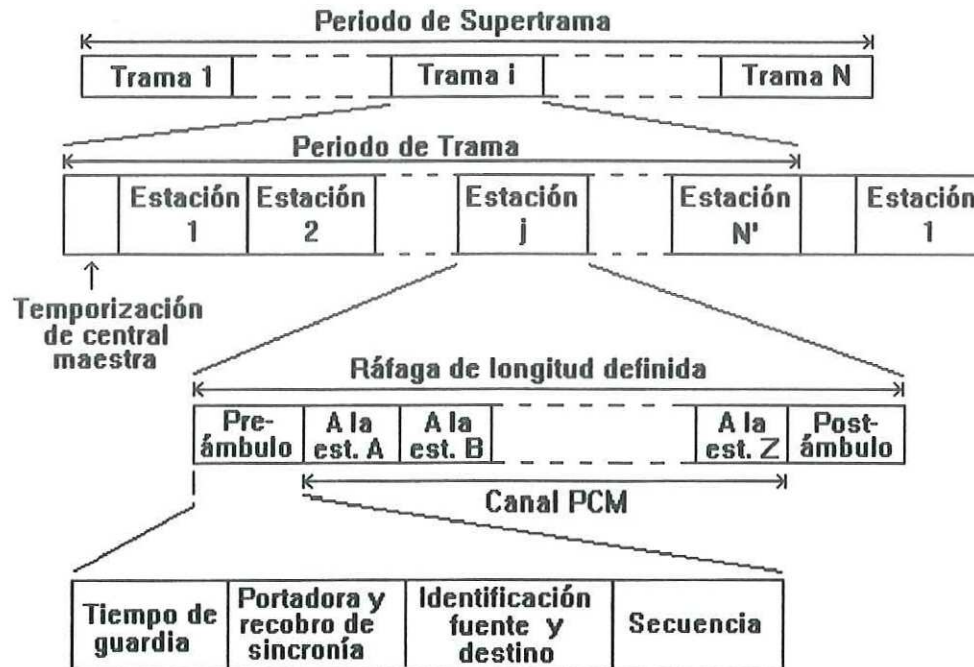


Figura 7. Esquema de una supertrama en TDMA.

La duración de una trama está definida por la velocidad de transmisión de la red, el número de estaciones que la conforman y el tráfico a cursar por la red. El tiempo que tarda en llegar un mensaje desde una estación transmisora hacia al satélite y la retransmisión de dicho mensaje del satélite a la estación receptora (retardo de propagación), juega un papel importante en la determinación de sincronía para cada estación.

La sincronía es proporcionada por la estación maestra al principio de cada trama, esta información es utilizada por cada estación para transmitir sus paquetes en la ranura temporal que le ha sido asignada en referencia al inicio de la trama.

Esta operación es de vital importancia para una red TDMA, ya que evita los traslapes entre los paquetes transmitidos por cada nodo. El ajuste requerido por diferencias en los retardos de propagación se realiza a partir de la recepción de

señal emitida por la misma estación, de la cual se extrae el error de temporización de la señal transmitida respecto al tiempo de referencia proporcionado por la estación maestra.

La capacidad de un canal de comunicación bajo la técnica de acceso TDMA depende de la velocidad de transmisión y el número de usuarios. Puede observarse en la figura 8, que el caudal eficaz máximo puede llegar a ser unitario (capacidad del canal). Sin embargo, puede observarse además que el retraso promedio es mayor a medida que se incrementa el número de paquetes por mensaje.

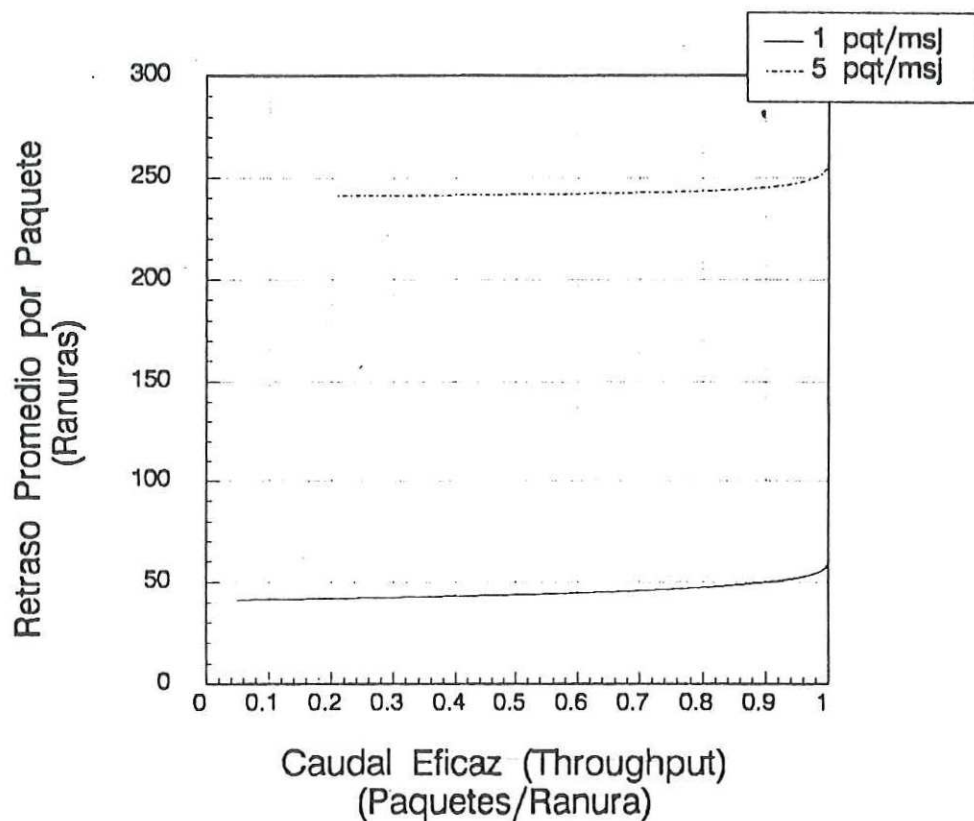


Figura 8. Caudal Eficaz vs. Retraso Promedio para el esquema TDMA con una velocidad de transmisión de 64 Kbps y 100 usuarios.

II.3.2 TDMA/DAMA.

Acceso Múltiple por División de Tiempo con Asignación por Demanda es un esquema un poco más complejo que TDMA simple y que requiere evidentemente mayor control. TDMA/DAMA se realiza con una asignación dinámica de las ranuras de tiempo para aquellas estaciones que así lo soliciten a través de un canal común de señalización hacia y desde una central maestra de control. Tanto la estación maestra como el resto de estaciones terrenas conocen en todo momento el estado de ocupación o disponibilidad que guardan los distintos canales para comunicación de la red. La capacidad para el manejo de tráfico es notablemente mayor que TDMA simple, por lo que una red con este esquema puede soportar un mayor número de usuarios con la misma calidad de servicio.

A una estación terrena pueden asignársele una o varias ranuras de tiempo de acuerdo a la cantidad de información que desea manejar y las condiciones de tráfico del momento. La configuración de una trama sufre constantes cambios conforme las asignaciones son modificadas, por lo que el control es invariablemente un proceso de tiempo real [Corona, 1991]. Una estación en estado de no transmisión (pasiva) puede en cualquier instante tomar un canal si estructura un paquete para su transmisión, por lo que requiere un constante monitoreo de los canales libres y ocupados aún en estado pasivo, además de recibir la información a ella destinada. Bajo este enfoque, la red posee un control distribuido y la operabilidad de esta red no se pierde con la ausencia de una o más estaciones. En una transmisión, la ocupación se realiza por canales pares, uno para transmitir y otro para recibir.

Estos paquetes contienen un preámbulo al igual que los paquetes de TDMA, formado por los campos de dirección fuente y dirección destino, un campo de control, el cual realiza varias funciones entre las que destacan la sincronía, longitud de paquete, y la velocidad, y un campo para detección y/o corrección de errores (CRC, Código de Redundancia Cíclica). Luego del preámbulo vienen los datos, el cual contiene la información propia del mensaje.

La unidad de almacenamiento y control transmite el paquete una vez que se ha estructurado completamente. La transmisión se realiza en ráfagas aleatorias. Todas las estaciones reciben la información referente a la dirección fuente y destino, pero el paquete completo es solo recibido por la estación a la que está dirigido el mensaje. La estación que recibe el paquete completo correctamente transmite un mensaje breve de reconocimiento indicando el suceso, por lo que la estación que origina el paquete conoce el éxito de su transmisión.

Sin embargo, por su característica de transmisión aleatoria, existe la posibilidad de un traslape entre dos o más paquetes de distintas estaciones, lo que ocasiona la pérdida de los paquetes, con la consecuente ausencia de reconocimiento de las estaciones receptoras. Para evitar una nueva colisión, cada estación retransmite sus paquetes aplicando una espera aleatoria.

Este retraso aleatorio es proporcionado por un circuito que hace que el tiempo que transcurre desde que la estación se ha enterado de la existencia de una colisión (la cual se detecta luego de una espera sin éxito del reconocimiento correspondiente en un tiempo constante) y el tiempo de retransmisión sea una variable aleatoria y la cual es distinta para cada estación y de una transmisión a la otra.

Con esta técnica, la probabilidad de que ocurra una nueva colisión entre las mismas estaciones es baja, pero puede ocurrir una nueva colisión con cualquier otro paquete de la transmisión de alguna otra estación.

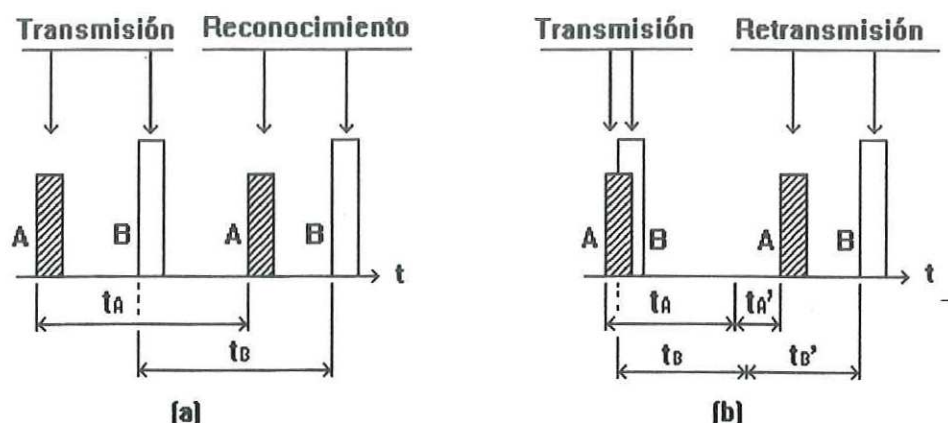


Figura 10. Operación de la técnica ALOHA puro en transmisión de paquetes.
a). Transmisión exitosa. b). Transmisión con colisión.

La figura 10 muestra la operación de ALOHA puro. La figura 10a muestra una transmisión exitosa. Los paquetes A y B se transmiten y cada estación espera por su reconocimiento; los tiempos de espera t_A y t_B no son necesariamente iguales; dependen del medio y la velocidad de propagación, así como la velocidad de procesamiento y estructuración de paquetes de cada estación. Para transmisiones por satélite, estos tiempos dependen además de las distancias entre las estaciones terrenas y el satélite y todos los elementos que pueden ocasionar retraso. Dentro de este tiempo de espera, deberán aparecer los reconocimientos respectivos para los paquetes A y B. La figura 10b muestra el caso de colisión entre dos paquetes A y B cuyas estaciones trasmisoras, al no recibir reconocimiento al concluir los tiempos de espera t_A y t_B respectivos, generan una retransmisión después de tiempos aleatorios t_A' y t_B' respectivamente [Corona, 1991].

En el análisis de este esquema hay que considerar que la colisión puede darse por dos o más paquetes, por lo que el número de estaciones activas es determinante en la eficiencia del protocolo. Por otra parte, es altamente probable la existencia de colisiones entre reconocimientos y paquetes, por lo que el método de reconocimiento minimiza grandemente la eficiencia del sistema.

Cabe señalar que la capacidad de canal frente al esquema ALOHA Puro es aproximadamente el 18% [Corona, 1991].

II.4.2 ALOHA RANURADO.

ALOHA ranurado es conceptualmente semejante a ALOHA puro, la diferencia primordial radica en que el espacio temporal es segmentado en ranuras de tiempo predefinido de longitud T segundos, proporcionado por un reloj maestro de sincronía, como lo muestra la figura 11. Cada estación contiene por el uso de una ranura y solo puede transmitir al inicio de un segmento.

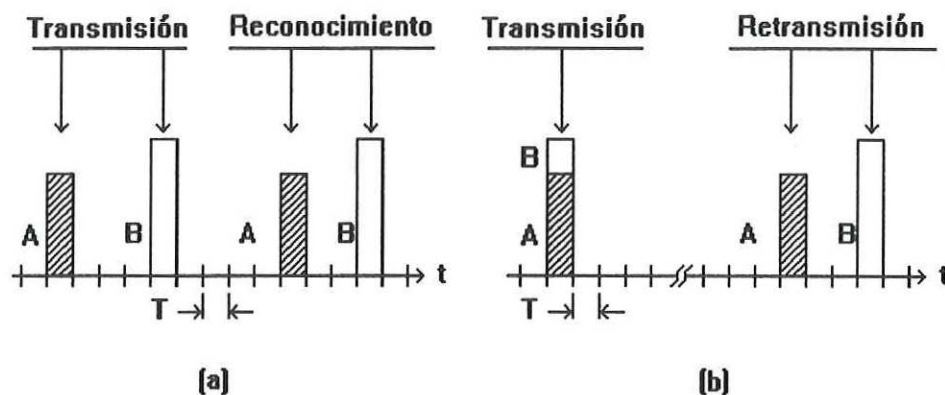


Figura 11. Operación de la técnica ALOHA ranurado en transmisión de paquetes
a) Transmisión exitosa. b) Transmisión con colisión.

La duración del paquete no puede ser mayor que la duración de una ranura de tiempo. En caso de manejarse mucha información, la unidad de almacenamiento y control de la estación terrena es responsable de dividir el mensaje en paquetes de duración definida, de forma tal que los paquetes sean de longitud fija.

Al igual que en el sistema ALOHA puro, la transmisión se realiza de manera aleatoria, por lo que existe la posibilidad de colisión como en el caso de la figura 11b. Al no presentarse el reconocimiento de recepción correcto del paquete, dicho paquete tendrá que retransmitirse posteriormente en un número de ranuras aleatorio. En mensajes muy largos, no todos los paquetes sufren colisión, por lo que la identificación del número de paquete en el campo de control del protocolo juega un papel importante. Una ventaja de ALOHA ranurado sobre ALOHA puro es que no hay necesidad de retransmitir todo el mensaje, sino solo el paquete o los paquetes que han sufrido colisión, además, la probabilidad de colisión entre paquetes es significativamente menor.

En la figura 12 se muestra el comportamiento del canal frente al esquema de acceso ALOHA Ranurado en términos de Caudal Eficaz contra Retraso Promedio por paquete. Se observa que la capacidad de dicho canal es aproximadamente el 36% y el sistema presenta características de inestabilidad. El retraso promedio es mayor a medida que el número de ranuras K para retransmisión se incrementa [Corona, 1991].

Comparativamente, el caudal eficaz en la transmisión de paquetes en un sistema ALOHA ranurado es el doble al caudal eficaz de un sistema ALOHA puro; debido a la disminución en el retraso de captura completa del mensaje, con lo que la eficiencia de la red respecto al manejo de tráfico es mayor.

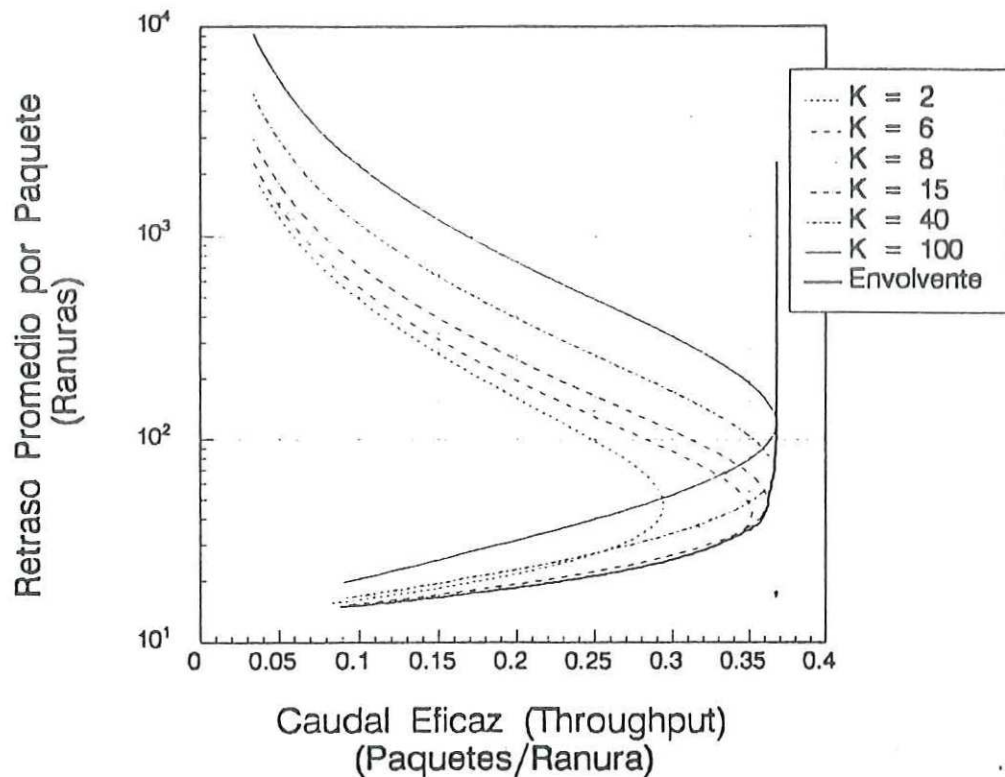


Figura 12. Caudal Eficaz vs. Retraso Promedio del esquema ALOHA Ranurado para una velocidad de transmisión de 64 Kbps, longitud de paquetes de 1120 bits y un retraso de propagación de 0.27 segundos.

II.4.3. ALOHA RANURADO ADAPTABLE.

ALOHA Ranurado Adaptable (ARA) puede ser considerado como un esquema combinado de ALOHA Ranurado con TDMA. Este esquema, se realiza muy similarmente a un esquema llamado SRUC (Split Reservation Upon Collision), de donde se retoma una aproximación para su modelo. Requiere un canal común de señalización para reservación de ranuras en los casos específicos en que se origina una colisión, ya que en operación normal, el canal se encuentra en modo de contienda. Este esquema permite reducir fuertemente el tiempo ocioso del canal y por consiguiente, incrementar la eficiencia del sistema.

En la figura 13, se muestran los resultados obtenidos en la simulación de los esquemas SRUC y ARA [Corona, 1991]. En dicha figura, destaca el hecho de que el esquema ARA puede alcanzar un Caudal Eficaz unitario, semejante al esquema TDMA, presentando por consiguiente una alta estabilidad y un Retraso Promedio bajo.

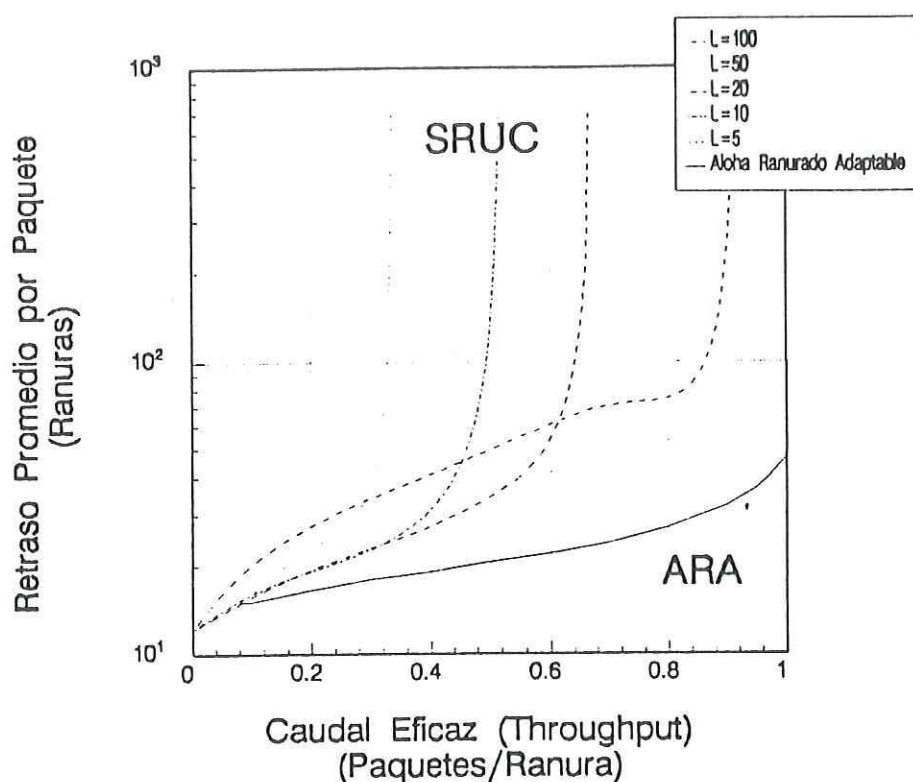


Figura 13. Caudal Eficaz vs. Retraso Promedio de los esquemas SRUC y ARA en función de distintas longitudes de marcos.

II.5 CONCLUSIONES.

El conocimiento de las generalidades de los distintos esquemas de acceso nos permiten realizar evaluaciones comparativas de aplicación y su eficiencia en distintos aspectos. La secuencia de presentación de los anteriores esquemas ilustran como las técnicas de acceso superan unas a otras respecto a capacidad del canal, eficiencia, caudal eficaz, y retraso de captura. Sin embargo, no son todas las características a evaluar de un sistema; otros factores muy importantes en la selección de un esquema son la aplicación específica, en la cual se busca la máxima adaptabilidad a las necesidades de comunicación, y la función costo-beneficio, la cual debe evaluarse cuidadosamente, considerando el tiempo de vida de operabilidad y la duración de equipo en el mercado como efecto del crecimiento tecnológico.

Estas no son todas las técnicas de acceso existentes y disponibles, algunas otras como Acceso Múltiple con Detección de Portadora (CSMA, Carrier Sense Multiple Access), utilizada ampliamente en redes locales de datos, y ALOHA ranurado adaptable, que es una combinación entre los esquemas ALOHA y TDMA, son ejemplos de esquemas muy versátiles de los cuales pueden encontrarse diversas modalidades operando exitosamente en distintos tipos de redes de comunicación.

La técnica de acceso múltiple CDMA, es un esquema que será estudiado con mayor detenimiento en los capítulos siguientes, así como sus modalidades más comunes, llevando al campo de simulación los parámetros que influyen en sus características de tráfico, con cuyos resultados abordaremos un análisis comparativo con los diversos esquemas de acceso.

III. ACCESO MULTIPLE POR DIVISION DE CODIGO.

III.1 INTRODUCCION.

Acceso Múltiple Por División de Código (CDMA, Code Division Multiple Access) es la nominación civil-comercial de los sistemas de comunicación de Acceso Múltiple en Espectro Extendido (SSMA, Spread Spectrum Multiple Access), la cual consiste en transmitir una señal de información (paquete) en un ancho de banda mucho mayor que el mínimo requerido en sistemas convencionales [Dixon, 1984].

CDMA posee una gran versatilidad y por ende, distintas modalidades, entre las que destacan CDMA en Secuencia Directa (DS/CDMA, Direct Sequence CDMA), CDMA con Saltos en Frecuencia (FH/CDMA, Frequency Hop CDMA), CDMA con Saltos en Tiempo (TH/CDMA, Time Hop CDMA) y CDMA con Saltos en Tiempo y en Frecuencia (TH/FH/CDMA). Con el esquema CDMA en Secuencia Directa, se cuenta con muchas de las bondades de Espectro Extendido, y sobre la cual existen numerosos trabajos de apoyo, siendo además, la técnica más simple de esta familia para implementación en circuitería. De esta forma, se elige DS/CDMA para estudiar las características del canal de comunicación y llevar dichos conceptos al campo de simulación. En el presente capítulo, se describen los conceptos esenciales de esta y otras modalidades de CDMA.

III.2. CAMPOS DE APLICACION.

CDMA es una técnica comunmente aplicada en sistemas de radio enlace por sus inherentes propiedades y las características del medio de propagación. Los sistemas de radio enlace utilizan la atmósfera libre como medio o canal de enlace en el que las transmisiones se propagan en forma difusa; cuyos efectos pueden ser minimizados con el empleo de antenas altamente directivas. CDMA presenta propiedades favorables en este tipo de esquemas, destacando entre ellas las siguientes [Pursley, 1987]:

a). Acceso Múltiple.-

El acceso múltiple es una propiedad indiscutible de la técnica CDMA, en el cual dos o más usuarios pueden emplear el mismo medio de comunicación en forma simultánea (figura 14). Cada usuario posee la habilidad de recibir paquetes direccionados a él, pero está sujeto a la interferencia ocasionada por los paquetes direccionados a otros usuarios.

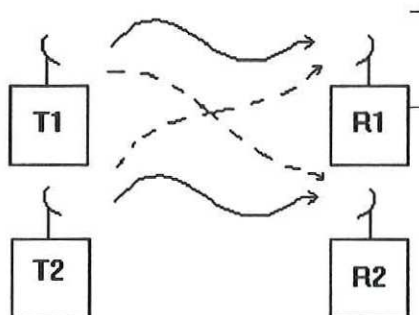


Figura 14. Acceso múltiple en un sistema de comunicación de radioenlace.

b). Captura.-

El efecto de captura está referido a la habilidad de un usuario para demodular al menos uno de los paquetes que comparten el mismo espacio temporal y espectro de frecuencias. La habilidad de una estación receptora para demodular una señal está en función del tipo y estructura de la red, número de usuarios, técnica específica CDMA utilizada, y muchos otros factores. Los dispositivos receptores son generalmente más complejos que los utilizados en esquemas convencionales.

c). Rechazo a trayectorias múltiples.-

Los usuarios que utilizan CDMA poseen la habilidad para efectuar la captura aún ante la presencia de trayectorias múltiples (figura 15), ocasionada por la diferencia de arribo de los paquetes por rebotes y difusión de las señales. Este aspecto se describe en la sección III.3.3.

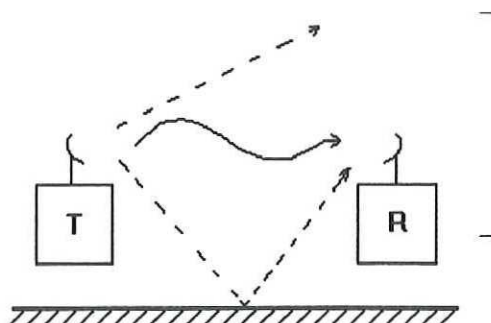


Figura 15. Trayectorias múltiples en un sistema de comunicación de radioenlace.

d). Rechazo a la interferencia.-

En el esquema de captura, el rechazo a la interferencia en banda angosta (intencional o no intencional), no depende fuertemente de las características de la

interferencia, sino de la capacidad de un usuario para discriminar de entre una gran variedad de señales (figura 16).

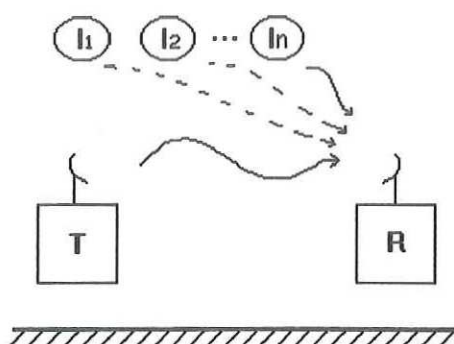


Figura 16. Interferencia en sistemas de comunicación de radioenlace.

El enfoque de este capítulo, se realizará en forma genérica, sin embargo, cabe señalar que la utilización de los conceptos se concretará a las características de un ambiente satelital para sentar las bases de diseño de una red VSAT con el esquema CDMA.

III.3 TECNICAS, CODIGOS Y PROTOCOLOS.

En CDMA, se hará referencia a "técnica", como la operación de la entidad física en que se desarrolla la transmisión-recepción, lo cual es llevado a cabo mediante la circuitería del sistema. El concepto "protocolo" se reservará a los métodos de paquetizar la información. En comunicaciones digitales, este último concepto se ilustra en la subdivisión de un paquete en dos campos principales: preámbulo y datos. Para CDMA, un aspecto de importancia lo representa el tipo de generación del código a utilizar por la estación transmisora y receptora.

III.3.1 TECNICAS.

La conceptualización de la técnica CDMA de espectro extendido es relativamente sencilla, pero en su formulación intervienen muchos otros elementos básicos de comunicación que brindan una gama extensa de modalidades. CDMA, como división principal de espectro extendido, puede desarrollarse en el campo analógico, sin embargo, su naturaleza como técnica de ensanchamiento de espectro mediante código la identifican más ampliamente dentro de las comunicaciones digitales. Las siguientes modalidades representan tres de las subdivisiones más importantes [Dixon, 1984] [Pickholtz, 1982].

a) CDMA en secuencia directa (DS-CDMA).

Si la dirección o código es modulada directamente sobre la portadora de radiofrecuencia. Esta técnica utiliza el ancho de banda disponible y el tiempo necesario para transmitir los mensajes de acuerdo a la velocidad de transmisión, la longitud del código y el tipo de modulación, por lo que la acotación radica en el recurso espectral y la duración de los mensajes. Los mensajes son de longitud predefinida, pero no se requiere sincronización para su transmisión. Todos los usuarios transmiten en el mismo ancho de banda cada vez que disponen de un mensaje.

b) CDMA con saltos en frecuencia (FH-CDMA).

Si la dirección digital se emplea para cambiar periódica y controladamente la frecuencia de la portadora en radiofrecuencia en forma periódica. El ancho de banda total se divide en intervalos de frecuencia más pequeños

con frecuencias centrales $f_1, f_2, \dots, f_n$, al igual que se realiza en un acceso múltiple por división de frecuencia. Cada usuario o estación posee un sintetizador de esas frecuencias centrales, a las que asigna un código. La transmisión se realiza con base en un código que se repite en forma periódica.

c) CDMA con saltos en tiempo (TH-CDMA).

Si la dirección digital se emplea para cambiar periódica y controladamente la ranura temporal en que se efectúa la transmisión. Para este esquema, cada ranura tiene una correspondencia a un segmento de código asignado a una estación. Dicho segmento se repite periódicamente.

Las técnicas anteriores pueden efectuarse en combinación con cualquiera de las dos modalidades siguientes:

a) Síncrona.

La cual precisa de una estación maestra de referencia que proporcione la sincronía. Las transmisiones dan inicio solo en tiempos discretos. La captura es más sencilla, pero esto requiere un equipo más complejo.

b) Asíncrona.

En la cual las estaciones transmiten libremente en cualquier instante si tienen un paquete listo, lo cual dificulta la captura de los mismos, sin embargo, la circuitería es más simple.

III.3.2 CODIGOS.

La multiplicación de la señal de información con un código para su transmisión en espectro extendido precisa de un método de generación de dicho código tanto en la unidad que transmite como su reproducción en la unidad receptora. A diferencia de los códigos convencionales, los códigos utilizados en CDMA poseen propiedades periódicas y aleatorias, por lo que se le denominan "códigos de pseudo-ruído" ó "secuencias pseudo-aleatorias". Sin embargo, no todos los códigos poseen las mismas propiedades, por lo que es necesario conocer sus características y repercusión en la aplicación a un sistema de espectro extendido. Algunas propiedades deseables en estos códigos son [Pickholtz et al., 1982]:

- a) De fácil generación.
- b) Ortogonalidad.
- c) Periodicidad larga.
- d) Balance entre ceros y unos.
- e) Aleatoriedad.
- f) De difícil reconstrucción para interceptores.

No todos los códigos cumplen con estas propiedades, y no en todos los sistemas se precisan. La familia o tipo de código a utilizar se encuentra en función de la aplicación, tamaño y tipo de red. De acuerdo a las longitudes de secuencias (códigos) descritas en [Dixon, 1984] y [Pickholtz et al., 1982], se deduce que pueden existir otras secuencias que por su forma de generación pueden clasificarse como:

i) Secuencia de longitud infinita.-

Este código no es aplicable en sistemas de comunicación debida a su completa aleatoriedad y difícil reconstrucción en el receptor. Sin embargo, puede convertirse en un código útil si se emplean sistemas con memoria y se establece un algoritmo entre la dependencia de una porción de código con la sucesiva.

ii) Secuencia de gran longitud pero definida.-

Esta secuencia se genera con registros de corrimiento y un polinomio primitivo. Este tipo de secuencia es la mas ampliamente utilizada en sistemas de Espectro Extendido. Este tipo de secuencia cumple con la mayoría de las propiedades deseadas, sin embargo, por su naturaleza pseudo-aleatoria, es difícil un adecuado control de la ortogonalidad, además de repercutir en grandes retrasos de captura.

iii) Secuencia simple de longitud fija.-

No cumple con muchas de las propiedades, sin embargo, es útil en aplicaciones civiles de redes pequeñas donde la dificultad de interceptación juega un papel secundario.

La generación de un código simple de longitud fija se logra a través de registros de corrimiento como el mostrado en la figura 17a. La longitud es un arreglo definido de acuerdo al número de celdas del registro, cuyo periodo de código es la duración de ciclos de reloj igual al número de celdas, y que puede o no ser el mismo que el de los bits de información [Dixon, 1984]. Un generador un poco más complejo es el mostrado en la figura 17b. La longitud de secuencia de

este tipo de código es menor o igual que 2^{k-1} , donde k es el número de celdas del registro. La periodicidad de las secuencias de los generadores 20a y 20b son iguales si $n = 2^k - 1$. Sin embargo, como no todos los vectores de la familia del código son útiles, es necesario desechar aquellos que no cumplen con las propiedades deseadas de ortogonalidad, y esto se logra mediante un arreglo de los coeficientes h de un polinomio primitivo $h(x) = x^k + h_{k-1}x^{k-1} + \dots + h_1x + 1$.

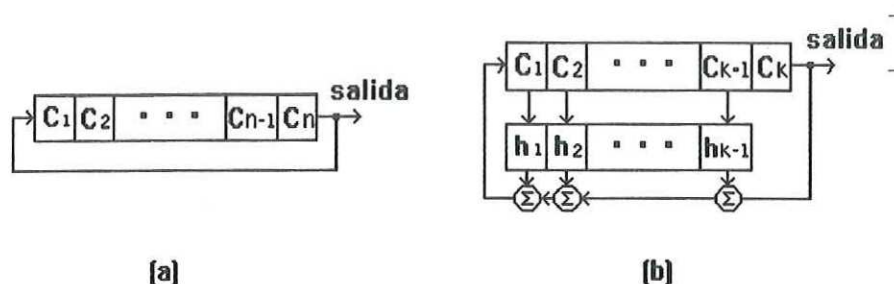


Figura 17. Arreglos de registros de corrimiento para generación de códigos.
a) Registro de recorrimiento simple.
b) Registro de recorrimiento operado por un polinomio primitivo.

Distintos arreglos de registros de corrimiento dan lugar a secuencias con características diversas. Dos familias de generadores de secuencia se presentan en la tabla I. La familia Gold es generada por dos o mas registros de corrimiento de igual longitud, mientras las secuencias de la familia Kasami se generan con dos registros de corrimiento de igual longitud y un registro de longitud menor.

Tabla I.- Familias Gold y Kasami para una longitud de generador $k=10$.

Familia	No. de secuencias	Correlación cruzada periódica máxima
Gold	$2^k + 1 = 1025$	$1 + 2^{(k+2)/2} = 65$
Kasami *	$2^{k/2} (2^k + 1) = 32800$	$1 + 2^{(k+2)/2} = 65$

* Las longitudes de registros de los generadores Kasami existen solo para $k=\text{par}$.

A manera de ejemplo, en las figuras 18a y 18b, se presentan dos generadores de secuencias de la familia Gold, cuya secuencia es larga y se operan a través de polinomios primitivos.

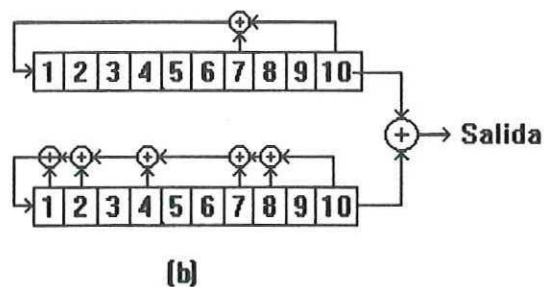
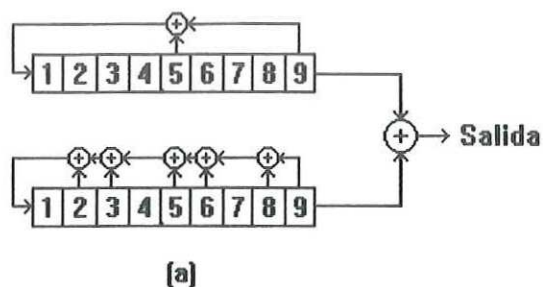


Figura 18. Generadores de secuencias de la familia Gold.
 a) Registros de recorrimiento de longitud 9 con periodicidad 511.
 b) Registros de recorrimiento de longitud 10 con periodicidad 1023.

III.3.3 PROTOCOLOS.

En la utilización del código para una paquetización de información bajo la técnica CDMA, son posibles tres estructuras básicas y dos híbridas. Las estructuras híbridas son derivadas de la combinación de dos estructuras básicas. La figura 19 muestra estos cinco tipos de paquetización, donde los paquetes son de duración $1/\mu$ segundos:

a). Protocolo base común (C).-

El código con el cual el paquete a transmitir se multiplica, es común a todas las estaciones, tanto en transmisión como en recepción.

b). Protocolo base transmisor (T).-

El código con el cual el paquete a transmitir se multiplica, es el código asignado a la estación o usuario transmisor como una dirección única, y las estaciones receptoras pueden en cualquier instante realizar la captura de la información de cualquier transmisor, inclusive su propia transmisión. Esto precisa de una rápida búsqueda de código para ser correlacionada con la señal entrante y un barrido en todo el intervalo de duración del código.

c). Protocolo base receptor (R).-

El código con el cual el paquete se multiplica, es el código asignado a la estación o usuario destino como una dirección única. Un receptor empleando este protocolo, solo tiene que realizar una comparación del código de la señal entrante y su propio código.

d). Protocolo Común-Transmisor (C-T).-

La porción del paquete que contiene al preámbulo se multiplica con un código común a todas las estaciones de la red, mientras la porción del paquete conteniendo datos efectivos se multiplica con el código asignado a la estación fuente.

e). Protocolo Receptor-Transmisor (R-T).-

La porción del paquete que contiene al preámbulo se multiplica con el código asignado a la estación que recibe dicho paquete, mientras la porción conteniendo datos efectivos se multiplica con el código asignado a la estación fuente.

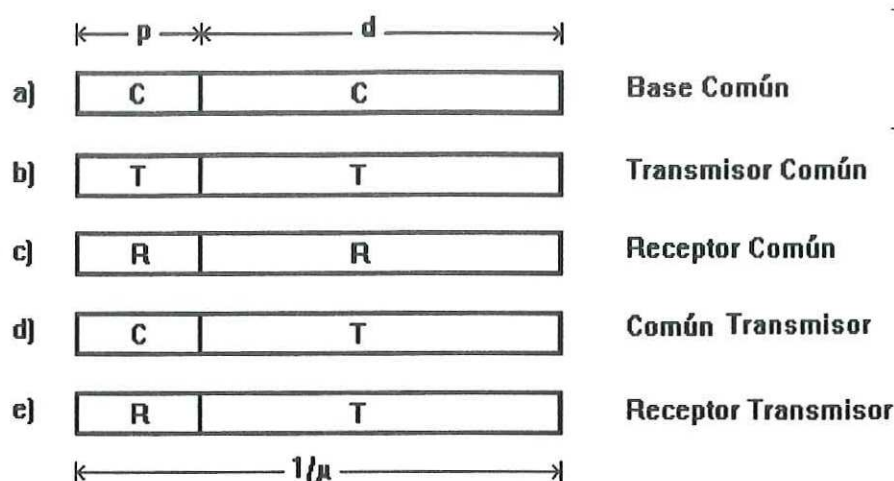


Figura 19.- Protocolos para paquetización de información en el esquema CDMA.

III.4 CDMA EN SECUENCIA DIRECTA DS/CDMA.

III.4.1 CONCEPTUALIZACION.

CDMA consiste en la asignación de un código binario único a cada estación de la red, como una dirección, la cual se modula directamente sobre la forma de onda de la portadora luego de ser multiplicada (convolución en el dominio de la frecuencia) por la información binaria (datos). Cada estación puede transmitir cada vez que lo desee utilizando para ello todo el ancho de banda ofrecido por el medio de transmisión (traspondedor para el caso específico de

comunicaciones vía satélite). CDMA opera tal si fuese una técnica de acceso múltiple por división de tiempo TDMA utilizando todo el ancho de banda ofrecido, con la diferencia de que CDMA dispone también de toda la gama temporal consecutiva necesaria para transmitir su información. La figura 20 muestra la distribución en tiempo y frecuencia de un transpondedor satelital, donde la franja horizontal representa una asignación de frecuencia y la franja vertical representa una asignación de ranura de tiempo; a diferencia de un paquete transmitido en espectro extendido, que puede utilizar todo el transpondedor en tiempo y frecuencia en forma simultánea o solo un segmento de ambos, pero sin restricciones de uso.

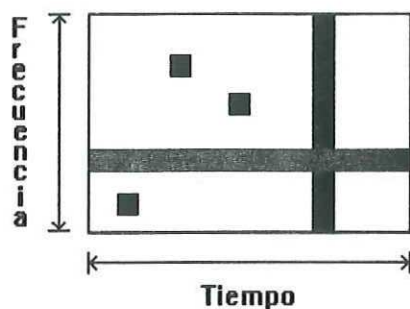


Figura 20. Transpondedor satelital disponible para CDMA.

CDMA no precisa de separación de frecuencias ni de ranuras de tiempo, estas características son suplementadas por la propia dirección o código que la estación transmisora superpone a la información. Los códigos son usualmente secuencias binarias periódicas los cuales se obtienen de un generador de secuencias binarias periódicas de longitud K para el caso de códigos simples de longitud definida. La figura 21 muestra como se realiza esta operación de superposición en la escala del tiempo (multiplicación), en el que la duración de

un bit de código (chip) es de duración T_c menor a la duración de un bit de información T_b . La relación T_b/T_c es conocida como factor de ensanchamiento [Gagliardi, 1984]. En la figura 21a, cada código modula exactamente un bit de información, mientras en la figura 21b y 21c, cada código modula a dos bits de información y 1/2 bit de información respectivamente. Esta correspondencia puede ser mayor de acuerdo a las posibilidades en la longitud periódica del código.

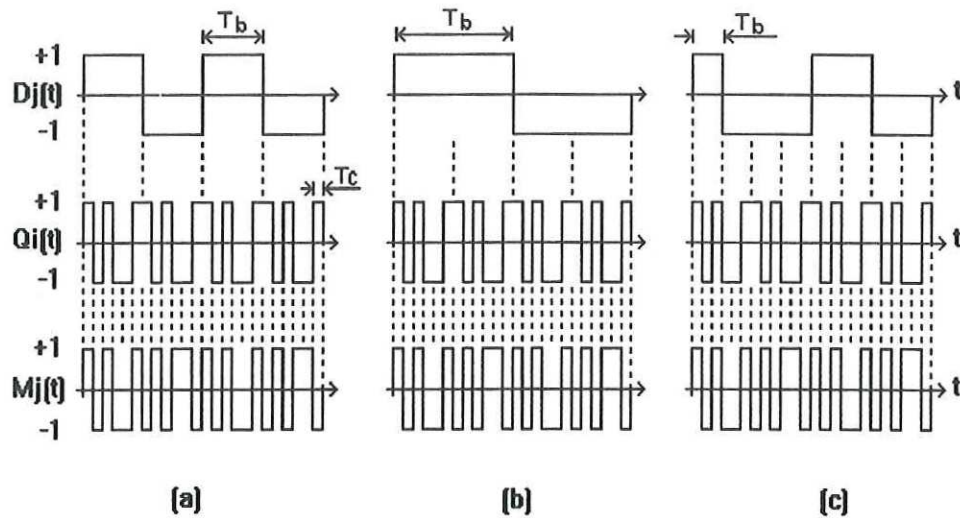


Figura 21. Multiplicación de código e información en la técnica CDMA.
a) $T_b = K T_c$. b) $T_b = 2 K T_c$ c) $T_b = K T_c / 2$.

III.4.2 ENFOQUE MATEMATICO.

Suponiendo que la transmisión se realiza con un "protocolo base receptor". La i -ésima estación receptora de la figura 22 tiene asignado el i -ésimo código $Q_i(t)$ con duración total $kQ_i(t)$. La información $D_j = \pm 1$ de la j -ésima estación transmisora es modulada en fase luego de ser superimpuesta al código $Q_i(t)$. Obteniéndose la modulación del producto $M_j = D_j(t)Q_i(t)$.

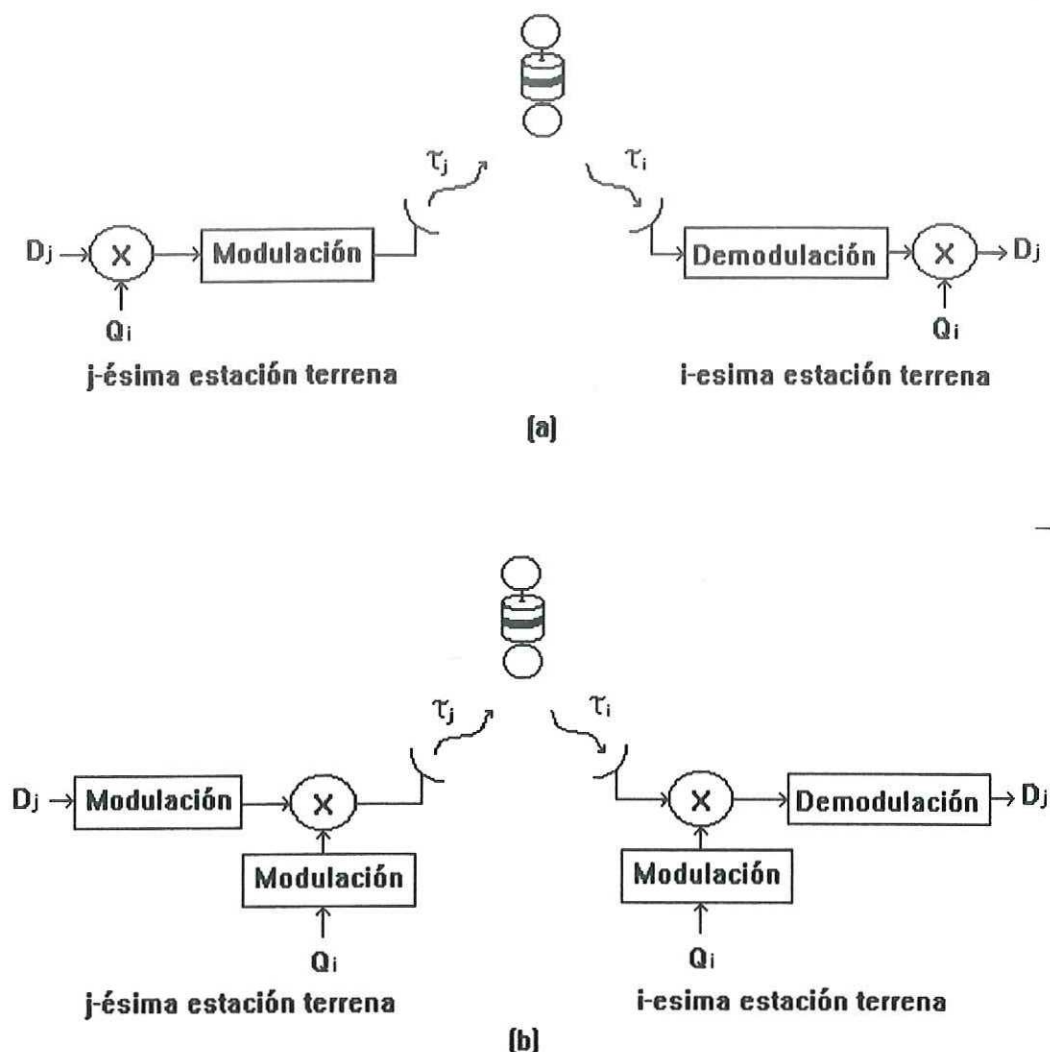


Figura 22. Diagrama a bloques del receptor y transmisor para la técnica CDMA.
 a). Ensanchamiento de señal por multiplicación de código y datos.
 b). Ensanchamiento de señal por convolución de señales moduladas.

La señal total en el canal de comunicación es la portadora total de todas las transmisiones simultáneamente activas con sus respectivos desplazamientos en tiempo y fase ocasionados por retrasos de propagación y la aleatoriedad de las transmisiones [Gagliardi, 1984]:

$$x(t) = \sum_{j=1}^k A_j M_j(t - t_j) \cos(W_c t + f_j) \quad (1)$$

donde k es el número de accesos simultáneos al satélite.

La decodificación de la información transmitida por la j -ésima estación terrena requiere de una referencia en tiempo y fase $r(t)$ dado por el producto:

$$r(t) = Q_j(t - t_j) A_j \cos(W_c t + f_j) \quad (2)$$

y la señal resultante es la decodificación de:

$$x_j = d_j A_j + c \quad (3)$$

$$= \frac{1}{T_b} \int_{t_j}^{t_j + T_b} r(t) x(t) dt \quad (4)$$

donde:

$$d_j = \pm 1.$$

A_j = Amplitud de la portadora de la j -ésima estación transmisora.

c = Portadora de intermodulación por contribución de las señales del resto de las estaciones transmisoras durante el intervalo de bit $\{ 0, T_b \}$.

La velocidad de símbolo está dada por $V_s = 1/T_c$ símbolos/segundo, por lo que una modulación de fase BPSK implica una banda de radiofrecuencia $B_r = 2/T_c$ Hz.

III.4.3. POTENCIA EN EL PROCESO DE RECEPCION.

Cuando se utiliza el protocolo "Base Receptor", es necesario que la estación receptora sea capaz de reconocer su propio código en la portadora total. Esto se logra correlacionando la señal de llegada con el código de la estación (figura 23), con objeto de lograr una sincronización con la información que efectivamente sea direccionada a ella. La máxima potencia que podrá manifestarse en el receptor está determinada por la autocorrelación del código asignado a dicha estación.

El rechazo a las trayectorias múltiples en este esquema queda en función de la duración de chip de código. Si el desfaseamiento en tiempo de las señales que llegan al destino por rebote en otras direcciones es suficiente, entonces el receptor podrá diferenciarlo con la señal de la trayectoria principal.

La figura 23a muestra un espectro teórico de una señal en el receptor cuando el código es absolutamente ortogonal y solo una estación transmite (la portadora por contribución del resto de estaciones es cero). La sincronía se logra cuando se obtiene la máxima potencia. La figura 23b muestra un espectro más real, cuando la portadora por contribución de las otras estaciones transmisoras no es cero y el código no es completamente ortogonal. Sin embargo, es posible obtener la sincronía si se presenta un pico máximo que exceda de un umbral predefinido, del cual el resto de portadoras no logran exceder. El tiempo máximo de captura de esta sincronía es igual o menor a la duración de un periodo completo de código $k T_c$. Sin embargo, este proceso de búsqueda de información (sincronía rústica), no es suficiente. Se precisa de un lazo de amarre de señal denominado sincronía fina.

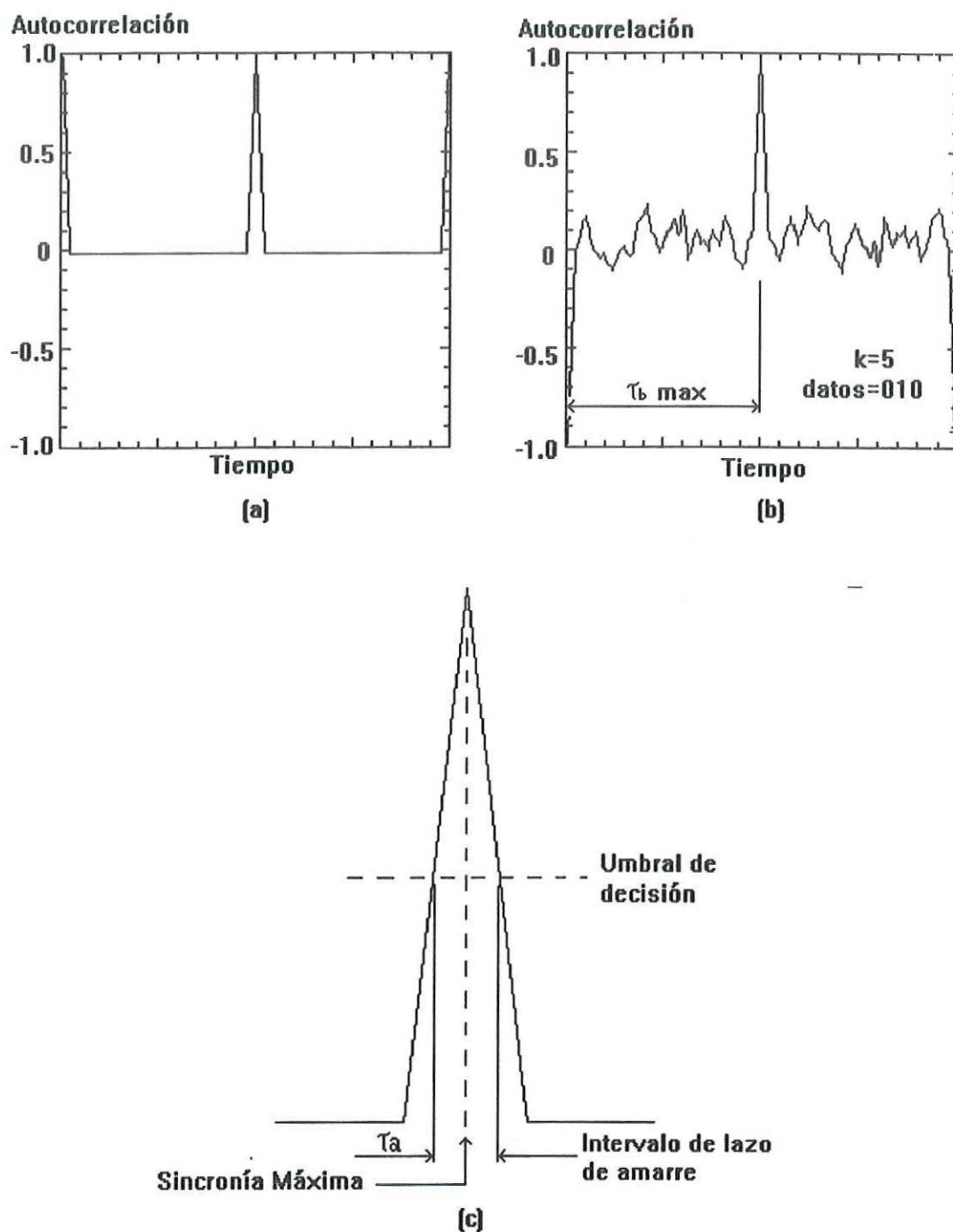


Figura 23. Espectro de potencia de recepción.
 a) Espectro de un código absolutamente ortogonal.
 b) Espectro de un código quasi-ortogonal.
 c) Función del lazo de sincronía fina.

El lazo de sincronía fina consiste en la búsqueda constante de la expresión máxima de potencia de señal luego que esta ha logrado exceder el umbral de decisión (figura 23c), por lo que existe un intervalo permisible de sincronía con el cual se mantiene el enlace [Dixon, 1984].

III.5 OTROS ESQUEMAS.

III.5.1 CDMA CON SALTOS EN FRECUENCIA FH/CDMA.

Con la modalidad de saltos en frecuencia de la técnica CDMA (FH/CDMA, Frequency Hopped CDMA), el ancho de banda del satélite se divide en bandas de frecuencia, tal como se efectúa para FDMA, sobre las cuales se realiza la transmisión en segmentos de tiempo contiguos. El código posee básicamente dos funciones: extender el espectro para la transmisión y hacer cambiar periódicamente la frecuencia central de transmisión con un patrón definido, lo cual constituye una matriz de identidad única para cada estación de la red. La figura 24 muestra un transpondedor satelital en tiempo y en frecuencia, el cual se ha segmentado en bandas de frecuencia, mostrando una identidad de una estación terrena.

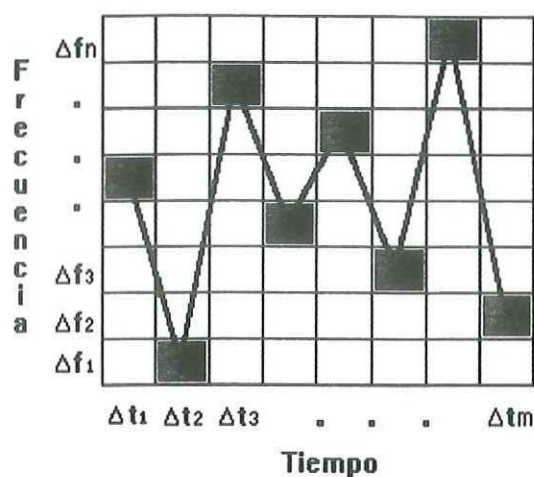


Figura 24. Transpondedor satelital bajo la técnica CDMA con saltos en frecuencia.

Cuando la relación entre las ranuras temporales y la duración T_b del bit de información es unitaria, el sistema es denominado CDMA con saltos lentos en frecuencia (SFH-CDMA, Slow Frequency Hopped CDMA). Así mismo cuando en el sistema se transmiten más de un bit de información por salto, en estos casos, cada bit de información o más se realizan con un salto en banda de frecuencia. Cuando el salto de banda de frecuencia se realiza varias veces por cada bit de información ($t < T_b$), el sistema es denominado CDMA con saltos rápidos en frecuencia (FFH-CDMA, Fast Frequency Hopped CDMA).

El salto en frecuencia es realizado por una interpretación del código asignado a cada estación. El código posee una segmentación entera igual al número de frecuencias disponibles en el sintetizador de frecuencias.

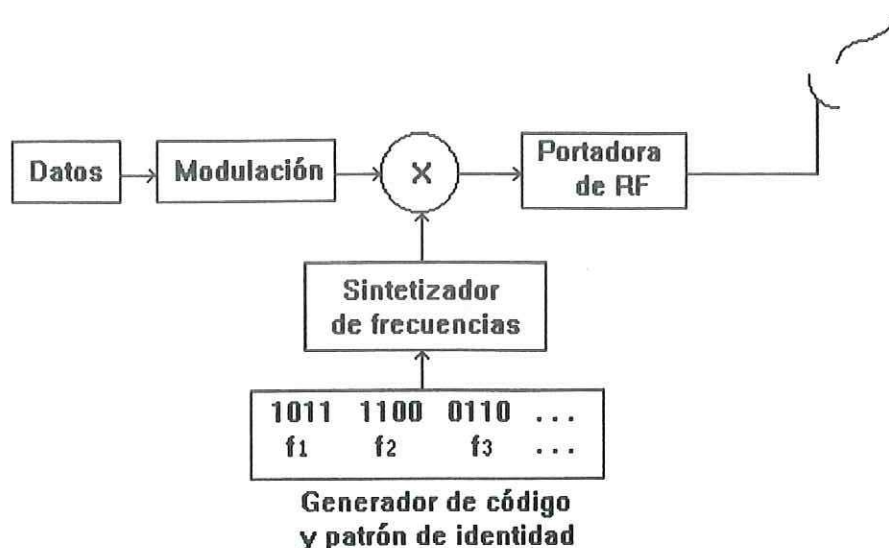


Figura 25. Esquema en bloques de un transmisor FH/CDMA.

El esquema en bloques de un transmisor FH/CDMA se muestra en la figura 25, en el cual, un código completo de longitud K ha sido subdividido para una correspondencia entre frecuencias $f_1, f_2, \dots, f_n$. La duración de las ranuras temporales para cada frecuencia están dadas por [Gagliardi, 1988]:

$$t = T_c \log_2 n \quad (\text{segundos}) \quad (5)$$

donde T_c es la duración de cada chip en el código y n el número de bandas de frecuencia. Cada estación activa en la red genera su propio patrón, con el cual los datos son convolucionados para su transmisión. En modo de recepción, la estación debe poseer la información necesaria del código generado por la estación transmisora, sincronía de inicio de cada código y correspondencia de frecuencias centrales para cada segmento de código como elementos mínimos para una adecuada demodulación.

Si los códigos asignados son altamente ortogonales, lo cual significa que sus correlaciones cruzadas son aproximadamente cero, el elemento interferencia es mínimo, aún bajo la incidencia de dos o más transmisiones en el mismo segmento de tiempo y frecuencia. Para n bandas de frecuencia, debe haber al menos $L \leq n$ patrones distintos que no deberán sufrir traslape. Para satisfacer esta ortogonalidad, podrán existir $n = 2t/T_c$ bandas de frecuencia, las cuales se incrementan linealmente con el ancho de banda del satélite ó exponencialmente con la velocidad de código; a diferencia de DS/CDMA, en que el número de usuarios se incrementa solo en forma lineal de acuerdo al código empleado [Gagliardi, 1984].

La técnica de modulación más comúnmente empleada en FH-CDMA es FSK (Frequency Shift Keying), en la que se utilizan dos frecuencias moduladoras distintas dentro de cada banda, al igual que ocurre en FSK tradicional, con la diferencia de ser empleadas solo en el intervalo temporal t . El resultado de la correspondencia de símbolos binarios para cada portadora es un ancho de banda de aproximadamente $2/t$ Hz alrededor de cada banda de frecuencia. Por tanto, para garantizar una adecuada decodificación, deberá proveerse una separación de $2/t$ Hz entre bandas, dando como resultado un soporte de $n = BW \ t/4$ bandas de frecuencia.

III.5.2 CDMA CON SALTOS EN TIEMPO TH/CDMA.

TH/CDMA (Time Hopped CDMA) es semejante en operación al esquema FH/CDMA, con la diferencia de que el código se utiliza para cambiar continua y controladamente una ranura temporal en la que se realiza la transmisión. La

figura 26 muestra un transpondedor satelital que se ha segmentado para utilización con la técnica TH/CDMA.

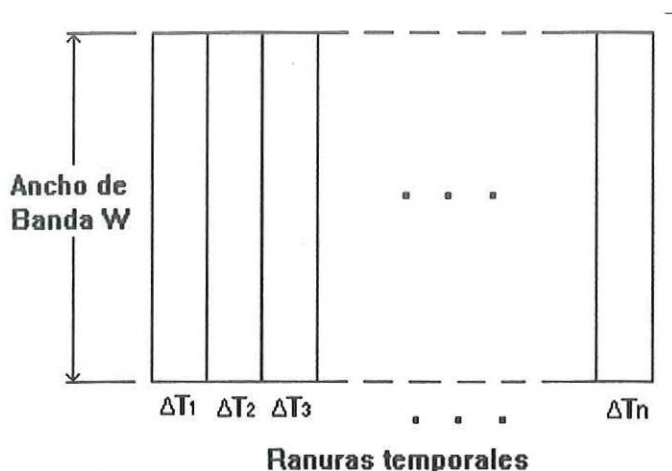


Figura 26. Transpondedor satelital segmentado en ranuras temporales.

Cada ranura corresponde a un código, una porción de código o una secuencia de códigos. Existe una gran semejanza con la técnica TDMA simple, sin embargo, TH/CDMA utiliza las ranuras en forma pseudoaleatoria para transmitir pequeños segmentos de información y no un paquete completo, pudiendo incidir dos o más usuarios en una misma ranura temporal.

Al igual que la técnica FH/CDMA, TH/CDMA requiere de un dispositivo que controle la transmisión del segmento de información para cada ranura temporal, para lo cual, dicho dispositivo debe poseer la capacidad de almacenar la información el tiempo necesario para enviar cada segmento de información en su ranura correspondiente dentro de cada trama.

Cada usuario posee un conjunto de códigos ortogonales tanto en secuencia como en correspondencia de ranura temporal. Considérese la figura 27, en que un grupo de m usuarios comparten el recurso espectral bajo la técnica

TH/CDMA en tramas compuestas por n ranuras temporales. Cada estación o usuario debe poseer una asignación distinta de secuencia para cada ranura de tiempo, por lo que al existir una incidencia de dos o más transmisiones en una ranura, la posible interferencia es minimizada por las diferencias en código.

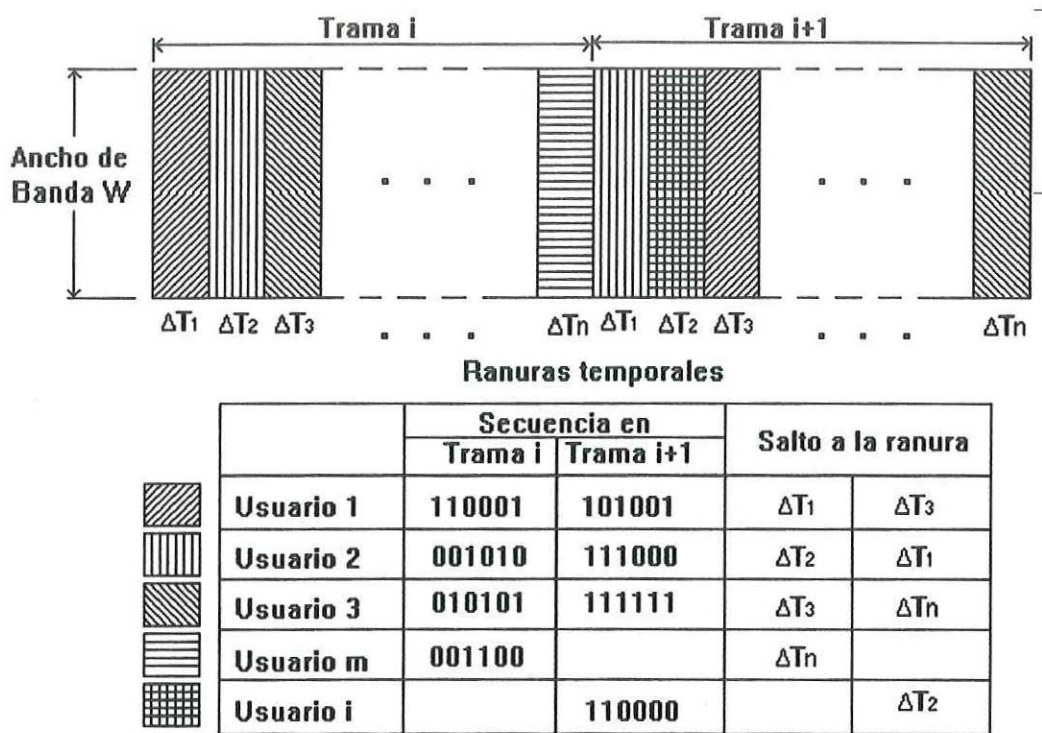


Figura 27. Transpondedor satelital segmentado en tiempo y asignación de código-tiempo para cada usuario del sistema.

La gran desventaja de esta técnica es su complejidad, tanto en el diseño físico como en la selección adecuada del conjunto código-segmento. Además es una técnica que requiere sincronía a través de una central maestra u otro medio que proporcione referencia de inicio de trama.

La velocidad de transmisión de símbolo V_s está en función de la técnica de modulación, el ancho de banda disponible y la duración de cada trama, así como de la relación de la información con el código (R_b/R_c).

Un transmisor para TH/CDMA se muestra en bloques en la figura 28. Con este esquema, el receptor debe contar con los medios para generar el mismo patrón de identidad con que se realiza la transmisión para una adecuada reconstrucción de la información. Esta capacidad la constituyen tanto la programática y un banco de memoria del receptor, así como la capacidad de la entidad física para generación de secuencias, captura y sincronía.

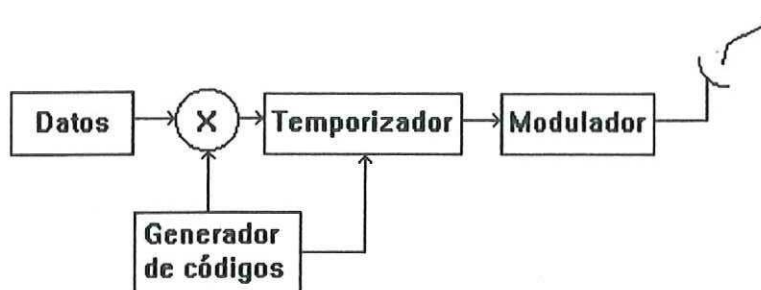


Figura 28. Diagrama en bloques de un transmisor TH/CDMA.

III.5.3 CDMA CON SALTOS EN FRECUENCIA Y TIEMPO FH/TH/CDMA.

En este esquema, el código con el cual se convuelve la información no solo es utilizado para cambiar continua y controladamente la frecuencia central de transmisión, sino también la ranura temporal en la que se realiza. Por tanto, la información transmitida en un transpondedor, puede representarse por una celda de área $W_f T_f$ como se ilustra en la figura 29, limitada en tiempo y en frecuencia, difiriendo en este sentido a sus esquemas generatrices.

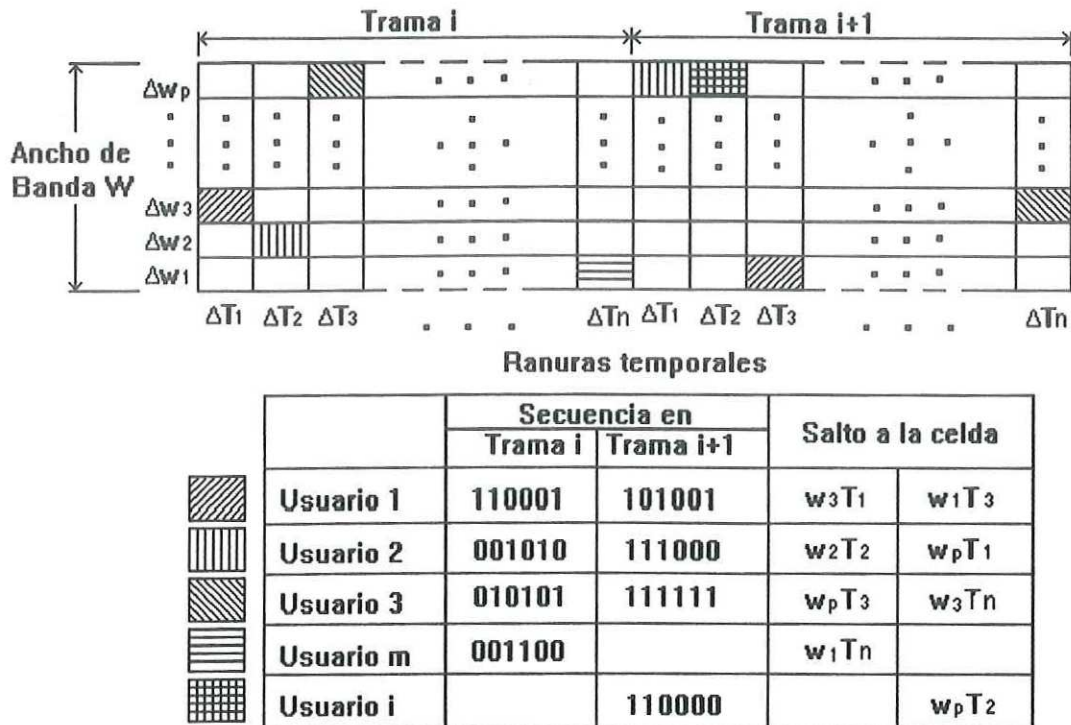


Figura 29. Transpondedor satelital utilizado bajo la técnica FH/TH/CDMA.

La estación transmisora posee un juego de secuencia, frecuencia y ranura temporal que se repite en forma periódica, dando el patrón identificativo, por lo que debe poseer un sintetizador de las frecuencias necesarias y un circuito temporizador para la transmisión en ranuras de tiempo. La incidencia de dos o más transmisiones en una misma celda es suplementada por las diferencias en código de cada usuario. La figura 30 muestra un diagrama a bloques general de un transmisor bajo la técnica FH/TH/CDMA, en el cual, el circuito temporizador realiza la retención de la información el tiempo necesario de acuerdo a su referencia de sincronía para la transmisión de la información en una ranura específica. Un sintetizador de frecuencia en conjunto con el modulador realizan la tarea de transportar la señal a transmitir a su frecuencia correspondiente, efectuando así un segmento del patrón identificativo de repetición periódica.

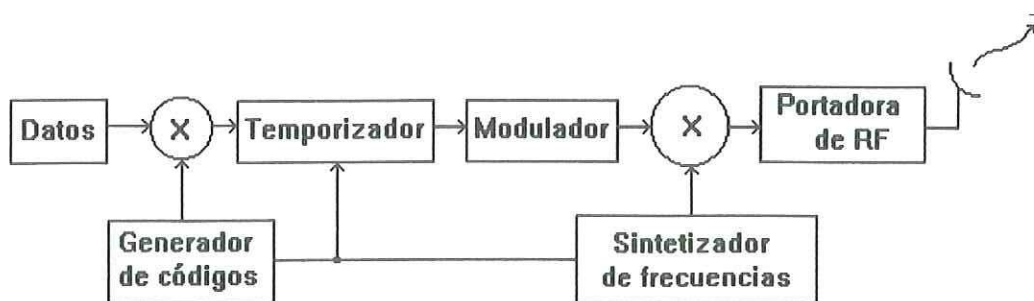


Figura 30. Diagrama en bloques de un transmisor FH/TH/CDMA.

El receptor debe contar con los medios de generación del mismo patrón identificativo en que se realiza la transmisión. Al igual que en los esquemas previos, el patrón identificativo puede ser el de la unidad transmisora o el de la unidad receptora, siendo el segundo el caso más simple para la adecuada reconstrucción de la información y menor tiempo de captura.

III.6. CONCLUSIONES.

CDMA es una técnica de acceso flexible y versátil que precisa un estudio de un gran número de parámetros y variables. Las principales modalidades de CDMA son: la técnica (DS/CDMA, FH/CDMA, TH/CDMA, etc.), las cuales pueden realizarse en forma síncrona o asíncrona. Existen algunas otras modalidades híbridas de la técnica de espectro extendido, las cuales han sido diseñadas para conjugar las mejores propiedades de dos o más esquemas. El código, cuya pertenencia a una familia (Kasami, Gold, Viterbi, etc.) y sus propiedades está en función de la forma de generación; y, el protocolo, el cual implica el tratamiento de la información para ser paquetizado y brinda además las características de tráfico y comportamiento de canal.

Las derivaciones de modelos matemáticos en términos de potencia de transmisión y recepción, son más complejos que para sistemas convencionales; sin embargo, la circuitería no es necesariamente más sofisticada. Algunas ventajas y desventajas generales de CDMA se presentan a continuación.

VENTAJAS.

- Proporciona comunicaciones altamente secretas.
- Mayor rechazo al ruido, intermodulación e interferencia que otros sistemas de acceso múltiple.
- Requerimiento mínimo de coordinación activa entre nodos de la red.
- Capacidad de direccionamiento selectivo.
- Facilidad relativa para adicionar más usuarios al sistema.

DESVENTAJAS.

- Número limitado de vectores ortogonales.
- Mayor dificultad de correlación de señal para número elevado de usuarios.
- Bajas velocidades efectivas de transmisión de información.
- Grandes requerimientos de ancho de banda.

IV. MODELO MATEMATICO.

El estudio de un sistema de acceso múltiple para aplicación civil, tiene su justificación si se intenta compartir el recurso espectral de frecuencia entre un grupo numeroso de usuarios para mejor utilización del ancho de banda disponible (eficiencia espectral).

IV.1. COMPORTAMIENTO DEL CANAL.

Para medir las cualidades de un sistema de acceso múltiple es necesario obtener los modelos de Retraso Promedio (RP), Caudal Eficaz (CE), y Capacidad de Canal (CC = maximo CE), siendo este último el de mayor interés en el análisis, ya que proporciona la máxima utilización del sistema. Estos tres modelos dependen en gran medida de la habilidad, bondades y carencias del protocolo que se emplee. Diversos protocolos pueden ser utilizados con la técnica CDMA de espectro extendido (sección III.3.3). La implantación de uno de estos protocolos debe realizarse en función de las demandas de tráfico del sistema, mientras las bases de diseño lo constituyen todos los parámetros de dicha red. Dichos parámetros lo son: la velocidad de transmisión de código e información y su relación con el ancho de banda disponible, la potencia de transmisión, el margen de interferencia, la probabilidad de error, la capacidad del canal y la estabilidad.

Algunos elementos necesarios para la obtención del modelo se describen a continuación.

IV 1.1. PROBABILIDAD DE COLISION.

Cada uno de estos protocolos posee sus propias características distintivas en virtud de las posibles colisiones entre uno o varios paquetes de información de un grupo de usuarios. Un paquete está constituido por un campo de direccionamiento y control (preámbulo) y un campo de datos.

Un paquete de información transmitido por una estación sufre una colisión bajo uno de los siguientes casos:

1. El paquete se transmite a una estación que se encuentra enlazada a otra estación.
2. El paquete se transmite a una estación (receptor) en forma simultánea con el paquete de otro transmisor.

Los siguientes conceptos se aplican en el evento de una colisión:

a). Longitud de Paquete con Probabilidad de Traslape (LPPT).

Es la porción del paquete de información que está sujeta a la compartición simultánea en tiempo del espectro de frecuencias con otros paquetes, sin que por ello el paquete dirigido a un receptor sufra necesariamente una colisión. Esto es posible con espectro extendido debido a que cada estación posee su propio código identificativo.

b). Probabilidad de Traslape Destructivo (PTD).

Es la probabilidad de que el paquete de información que ha sufrido un traslape parcial o total sea con efectos tales que la información contenida en el paquete se pierda (colisión).

El mencionar diferencias en las longitudes de posibles traslapes, tiene sentido solo si se considera que la paquetización se realiza en dos porciones: preámbulo y datos. La figura 31 muestra la llegada de dos paquetes desde el punto de vista del extremo receptor.

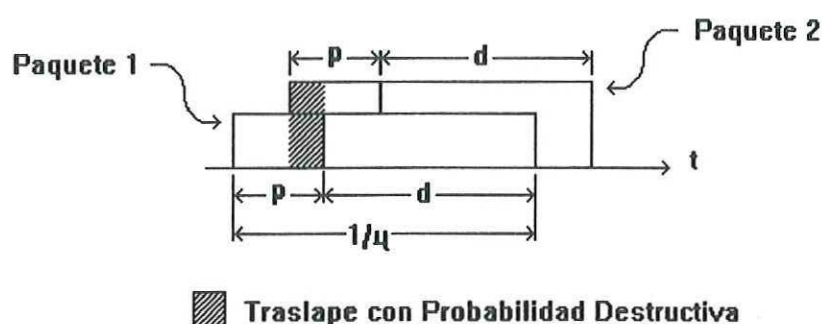


Figura 31. Traslape de dos paquetes vistos por un receptor.

La longitud total de los paquetes en la figura 31 es de una duración promedio $1/\mu$ segundos, por lo que μ es la tasa de servicio; $1/\mu$ se distribuye en preámbulo de duración p segundos y porción efectiva de datos con duración d segundos.

Para un protocolo "base común", la PTD se da en cualquier instante en que se presente el traslape, mientras para un protocolo "base transmisor" la PTD es mínima (considerando absoluta ortogonalidad de los códigos). Para un protocolo

"base receptor", la PTD se presenta solo si inciden dos o más paquetes de arribo al mismo receptor.

En los protocolos híbridos CT y RT, el RP Y el CE dependen principalmente de la longitud del preámbulo y su relación con la longitud total del paquete. Bajo las mismas condiciones de tráfico, las probabilidades de colisión de los distintos protocolos son [Chen y Oksman, 1991]:

$$PTD_{BC} \geq PTD_{CT} \geq PTD_{RT} \geq PTD_{BR} \geq PTD_{BT} \quad (6)$$

y la relación intrínseca de probabilidades entre los protocolos híbridos es:

$$PTD_{RT} \leq \frac{1}{N-1} PTD_{CT} \quad (7)$$

donde N es el número de usuarios en la red (estaciones o nodos).

Para una distribución de Poisson de arribo de paquetes a un receptor con tasa media de llegada λ , las PTD de estos dos protocolos son:

$$PTD_{CT} = 1 - \exp(-\lambda np) \quad (8)$$

$$PTD_{RT} = \frac{1}{N-1} [1 - \exp(-\lambda np)] \quad (9)$$

donde:

n = número de usuarios libres en la red.

p = longitud relativa del preámbulo de longitud $1/\mu$ segundos.

En el capítulo siguiente, se utilizan estas ecuaciones en la formulación del modelo markoviano de simulación para las tasas de transición entre estados.

IV.1.2. RETRASO PROMEDIO, CAUDAL EFICAZ Y CAPACIDAD DE CANAL.

En el comportamiento de una técnica de comunicación, y en especial, para comunicaciones de espectro extendido, estos tres parámetros de evaluación pueden derivarse de un análisis de probabilidades de ocupación de estado en un proceso Markoviano [Sousa y Silvester, 1988]:

$$CC = \sum_{i=0}^{N/2} \sum_{j=0}^{N-2i} ip(i, j) \quad (10)$$

$$CE = \frac{2}{N} CC \quad (11)$$

$$RP = \frac{\sum_{i=0}^{N/2} \sum_{j=0}^{N-2i} jp(i, j)}{CE} \quad (12)$$

en donde:

N = Número total de usuarios en la red.

i = Número de enlaces exitosos en la red.

j = Número de nodos envueltos en colisión.

p(i, j) = Probabilidad de ocupación del estado E(i, j).

En el proceso intervienen un conjunto de parámetros en relación al protocolo y características de la red. Sin embargo, en dicha expresión no participa

el tipo de protocolo en forma directa, es decir, la expresión matemática del modelo es la misma para los distintos protocolos. Las diferencias radican básicamente en las tasas de transición. Este es un modelo bidimensional sencillo, en el que se precisa determinar cada una de las probabilidades de ocupación de los estados posibles en función de los parámetros i , j , y N . El esquema bidimensional generalizado de un sistema markoviano se muestra en la figura 32, con cuyo análisis se obtienen las ecuaciones para las tasas de transición de estados de los protocolos que se han de caracterizar:

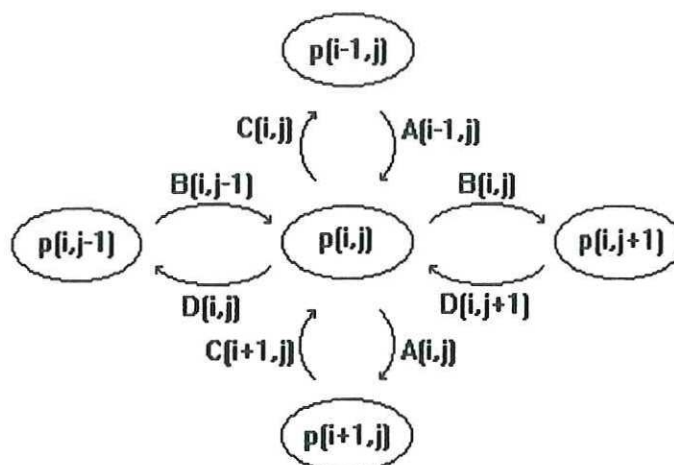


Figura 32. Esquema general de un modelo de Markov en dos dimensiones.

Estas tasas de transición representan el número de paquetes que, encontrándose en un estado definido, cambian a algún estado vecino ocasionado por un nuevo evento de la red. Debe observarse que este modelo no considera la transición del estado $E(i, j)$ al estado $E(i, j)$, es decir, el esquema es representativo de un sistema no ranurado. Las ecuaciones de las tasas de transición para cada protocolo que a continuación se muestran, han sido obtenidas bajo las siguientes condiciones:

- Cada estación puede transmitir en cualquier instante en que disponga de un paquete de información, por lo que se supone que la transmisión es asíncrona.
- Los paquetes son de longitud predefinida $1/\mu$ segundos.
- Una estación puede transmitir o recibir paquetes hacia y desde cualquier otra estación perteneciente a la red, con lo que se supone que la arquitectura es tipo malla.
- No hay una central maestra de control de tráfico.
- Todas las estaciones transmiten con igual potencia promedio, con lo que se suponen códigos balanceados.
- Ninguna estación puede transmitir y recibir paquetes de manera simultánea, por lo que dado el caso, las estaciones envueltas sufren una colisión y los paquetes se pierden.

IV.1.2.1. ECUACIONES DE TASAS DE TRANSICION.

a). Protocolo base receptor [Sousa y Silvester, 1988]:

$$A(i, j) = \lambda n(n - 1) / (N - 1) \quad (13)$$

$$B(i, j) = \lambda n(N - n) / (N - 1) \quad (14)$$

$$C(i, j) = i\mu \quad (15)$$

$$D(i, j) = j\mu \quad (16)$$

b). Protocolo común transmisor [Chen y Oksman, 1991]:

$$A(i, j) = \lambda \frac{n(n-1)}{N-1} \exp(-\lambda np / \mu) \quad (17)$$

$$B(i, j) = \lambda \frac{n}{N-1} \left[(N-n) + (n-1)(1 - \exp(-\lambda np / \mu)) \right] \quad (18)$$

$$C(i, j) = i\mu \quad (19)$$

$$D(i, j) = j\mu \quad (20)$$

c). Protocolo receptor transmisor [Chen & Oksman, 1991]:

$$A(i, j) = \lambda \frac{n(n-1)}{N-1} \left[1 - \frac{(1 - \exp(-\lambda np / \mu))}{N-1} \right] \quad (21)$$

$$B(i, j) = \lambda \frac{n(N-n)}{N-1} + \lambda \frac{n(n-1)}{N-1} \left[\frac{1 - \exp(-\lambda np / \mu)}{N-1} \right] \quad (22)$$

$$C(i, j) = i\mu \quad (23)$$

$$D(i, j) = j\mu \quad (24)$$

En este modelo, se han considerado las características de tráfico normalizado λ / μ y el tipo de protocolo para longitudes definidas de paquete con una distribución de arribo tipo Poisson.

En el capítulo siguiente, se describe el proceso para determinación de las probabilidades de ocupación de estado en función de las tasas de transición en cada uno de los protocolos y el proceso programático requerido para determinación de los parámetros RP, CE y CC.

IV.2 EFICIENCIA.

La capacidad de un canal de comunicación debe medirse en términos del número de usuarios y tráfico que es capaz de soportar. En particular para CDMA, esta capacidad debe conceptualizarse para un ancho de banda perfectamente definido, ya que en el concepto amplio de espectro extendido, esta capacidad tiende a infinito a medida que el recurso espectral se incrementa.

Un modelo que nos proporciona herramientas de medición de esta capacidad es la eficiencia espectral, la cual se define como [Gilhousen et. al., 1990]:

$$\eta \equiv N \frac{R_b}{W_s} \frac{\frac{C}{N_o W_s}}{\frac{E_b}{N_o}} \quad (25)$$

donde:

N = Número de usuarios.

R_b = Velocidad de transmisión de bit de información (bps).

W_s = Ancho de banda equivalente (Hz).

N_o = Densidad espectral de ruido en el ancho de banda equivalente.

E_b = Energía del bit de información.

C = Portadora total en el sistema $C = NR_b E_b$.

En CDMA, debe considerarse que la densidad espectral de ruido inherente del canal (AWGN) produce un efecto mínimo comparado con el fenómeno de interferencia de densidad espectral promedio J_o .

Con esto, el modelo de eficiencia para CDMA se define como:

$$\eta_{CDMA} = \frac{\frac{C}{N_o W_s}}{\frac{E_b}{N_o + J_o} \left(1 + \frac{C}{N_o W_s} \left(\frac{N-1}{N} \right) \right)} \quad (26)$$

La capacidad del canal se obtiene en términos de la eficiencia máxima. Esto se logra para condiciones ideales de $N_o \gg J_o$ y $N \approx \infty$.

$$CC = \eta_{CDMA}(\max) \quad (27)$$

IV.3 INTERFERENCIA Y PROBABILIDAD DE ERROR.

En la presente sección, se muestra una expresión para probabilidad de error de la técnica de espectro extendido DS/CDMA en función de la interferencia que experimenta y la energía de bit de información. Existe una marcada dependencia entre esta expresión y la técnica de modulación empleada. Sin embargo, este análisis se limitará a la relación entre la densidad espectral de señal (S) y la densidad espectral de ruido total ($N_o + J_o$), que corresponden a la densidad de ruido inherente del canal en el ancho de banda utilizado para la transmisión y la interferencia, la cual se describe posteriormente, así como su influencia sobre el valor de probabilidad de error.

La densidad espectral de ruido total para los sistemas de comunicación en general, depende de [Ha, 1986]:

- Ruido intrínseco del canal de comunicación (Ruido Blanco Aditivo y Gaussiano).
- Interferencia de intermodulación.
- Interferencia por canales vecinos.
- Interferencia por canales compartidos.
- Interferencia por trayectorias múltiples.

No todos estos casos se presentan en un sistema de comunicación, sin embargo, hay una repercusión notoria de la mayoría de ellos para la técnica DS/CDMA. Para efectos del modelo, se llamará a la densidad espectral promedio de ruido (AWGN) "Interferencia no intencional ($N_0/2$)". Comúnmente, la "Interferencia intencional (Jamming)", en este sistema, suele ocasionar problemas de mayor gravedad y recibe por tanto especial atención en el modelo de probabilidad de error.

IV.3.1. PROBABILIDAD DE ERROR ANTE INTERFERENCIA UNIFORME.

La función del receptor es volver la información a su ancho de banda original. Este proceso implica una correlación de la señal de llegada en la antena del receptor con el código; sin embargo, se supone que a la señal originalmente transmitida se le ha añadido una señal de interferencia con densidad espectral promedio efectiva $J_0/2$, donde $J_0 = J/R_c$; J y R_c son la potencia promedio de interferencia y la velocidad de código (chip rate) respectivamente. La potencia promedio de la portadora C está en función de la energía de bit de la señal de información y su velocidad de transmisión $C = E_b R_b$.

Así, la relación portadora a interferencia estará dada por [Ha, 1986] :

$$\frac{C}{J} = \left(\frac{E_b}{J_o} \right) \left(\frac{R_b}{R_c} \right) \quad (28)$$

normalmente, el proceso de ganancia G es mucho mayor que la unidad ($R_c/R_b \gg 1$), lo cual ocasiona que el margen de interferencia J/C sea más grande que en sistemas convencionales en un factor G . Desde el extremo del receptor, la relación de energía de bit a densidad espectral de ruido más interferencia es:

$$\frac{E_b}{N_o'} = \frac{E_b}{N_o + J_o} \quad (29)$$

puede demostrarse fácilmente que el margen de interferencia (J/C) está dado por:

$$\frac{J}{C} = G \left(\frac{N_o' - N_o}{E_b} \right) \quad (30)$$

La expresión previa proporciona la influencia de una "interferencia intencional" en un sistema de espectro extendido. Sin embargo, la diferencia entre un sistema convencional de banda angosta y espectro extendido referente a la técnica de modulación es mínima considerando que la salida en un filtro integrador es aproximadamente Gaussiano. Así, la probabilidad de error de bit en un sistema con modulación BPSK puede obtenerse con la expresión:

$$P_e = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_o'}} \right) \quad (31)$$

para obtener:

$$P_e = \left(\sqrt{\frac{N_o'}{4\pi E_b}} \right) \exp\left(-\frac{E_b}{N_o'}\right) \quad (32)$$

y el margen de interferencia intencional uniforme depende entonces de la energía de bit de información y el punto de operación en la probabilidad de error de bit. Estos lineamientos son de gran importancia en el diseño de un enlace de red con la técnica de espectro extendido, y en especial para aplicaciones de comunicaciones vía satélite.

IV.3.2. PROBABILIDAD DE ERROR ANTE INTERFERENCIA PULSADA.

Se infiere que la probabilidad de error de bit en espectro extendido en presencia de interferencia uniforme, es ligeramente mayor que la probabilidad de error de bit en un sistema convencional bajo condiciones similares, ya que su modelo en función de la técnica de modulación no es muy diferente, pero sí lo es respecto a la interferencia ocasionada por usuarios simultáneos que comparten el canal de comunicación. Este concepto es meramente relativo, y presenta algunos aspectos críticos cuando el tipo de interferencia es pulsada.

Considerese que la interferencia intencional se concentra en un pulso muy breve pero de gran intensidad, de duración "d" y densidad espectral de potencia de interferencia promedio $J_o/2d$. Solo la fracción dE_b de la energía de información será

invariantemente destruida, con lo que el bit total de información será erróneo. Con la anterior consideración, se obtiene:

$$P_e = \left(\sqrt{\frac{dJ_o}{4\pi E_b}} \right) \exp\left(-\frac{dE_b}{J_o} \right) \quad (33)$$

Considerando la relación intrínseca T_b/T_c aproximadamente igual a la relación entre las energías de bit y código (E_b/E_c), la probabilidad de error de bit depende ahora de las características relativas de T_c y d . Si $T_c \gg d$, la información puede reconstruirse por completo en el receptor, si por el contrario, $T_c \ll d$ pero $d \ll T_b$, el bit de información podrá ser erróneo, y más aún, se corre el riesgo de perder la sincronía de amarre de información. Por otra parte, si $d \gg T_b$, el caso específico puede considerarse como interferencia uniforme.

Este tipo de situaciones pueden fácilmente ser evitadas aplicando codificación para control de errores en la modulación (FEC, Forward Error Control), de manera que se transmita más de un bit de código en cada Hertz de banda disponible.

V. SIMULACION POR PROGRAMA.

El objetivo del presente capítulo es describir el proceso requerido para la obtención de las gráficas correspondientes de RP, CE y CC de los protocolos "base receptor", "común transmisor" y "receptor transmisor", bajo condiciones de tráfico variable.

V.1. PARAMETROS DEL MODELO.

En el capítulo IV, sección 3, se proporcionaron las ecuaciones de tráfico (ecuaciones 10, 11 y 12), cuyas soluciones difieren exclusivamente en términos de las tasas de transición para cada protocolo, según las ecuaciones de la 13 a la 24. La tabla II muestra los parámetros y sus unidades requeridas para dicha aplicación [Chen y Oksman, 1991].

Tabla II. Parámetros del proceso de solución en las ecuaciones de tráfico para CDMA.

PARAMETRO	DESCRIPCION	UNIDADES
N	Número total de estaciones en la red (nodos)	No requiere
i	Número de enlaces exitosos	No requiere
j	Número de nodos envueltos en colisión	No requiere
n	Número de nodos en estado libre ($n - 2i - j$)	No requiere
P	Longitud relativa del preámbulo	No requiere
λ	Tasa de llegada	Paq/seg
μ	Tasa de servicio	Paq/seg

El tráfico normalizado (λ / μ) se emplea en el modelo, de forma tal que no se precisa un manejo de unidades en ningún segmento del proceso.

La tabla III proporciona los parámetros requeridos en el modelo markoviano general. Estos parámetros son los que requieren calcularse durante el proceso.

Tabla III. Parámetros del modelo markoviano general de la figura 32.

$p(i,j)$	Probabilidad de ocupación del estado $E(i,j)$
$A(i,j)$	Tasa de transición del estado $E(i,j)$ al estado $E(i+1,j)$
$B(i,j)$	Tasa de transición del estado $E(i,j)$ al estado $E(i,j+1)$
$C(i,j)$	Tasa de transición del estado $E(i,j)$ al estado $E(i-1,j)$
$D(i,j)$	Tasa de transición del estado $E(i,j)$ al estado $E(i,j-1)$

En la figura 33 se muestra un arreglo matricial como resultado de un análisis del modelo bidimensional de Markov de primer grado para un caso específico de número de usuarios $N = 6$, donde $S(i, j)$ representa la suma de las tasas de transición i, j .

	P_{00}	P_{01}	P_{02}	P_{03}	P_{04}	P_{05}	P_{06}	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{20}	P_{21}	P_{22}	P_{30}
0	S_{00}	$-D_{01}$	0	0	0	0	0	$-C_{10}$	0	0	0	0	0	0	0	0
1	$-B_{00}$	S_{01}	$-D_{02}$	0	0	0	0	0	$-C_{11}$	0	0	0	0	0	0	0
2	0	$-B_{01}$	S_{02}	$-D_{03}$	0	0	0	0	0	$-C_{12}$	0	0	0	0	0	0
3	0	0	$-B_{02}$	S_{03}	$-D_{04}$	0	0	0	0	0	$-C_{13}$	0	0	0	0	0
4	0	0	0	$-B_{03}$	S_{04}	$-D_{05}$	0	0	0	0	0	$-C_{14}$	0	0	0	0
5	0	0	0	0	$-B_{04}$	S_{05}	$-D_{06}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	$-B_{05}$	S_{06}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	$-A_{00}$	0	0	0	0	0	0	S_{10}	$-D_{11}$	0	0	0	$-C_{20}$	0	0	0
8	0	$-A_{01}$	0	0	0	0	0	$-B_{10}$	S_{11}	$-D_{12}$	0	0	0	$-C_{21}$	0	0
9	0	0	$-A_{02}$	0	0	0	0	0	$-B_{11}$	S_{12}	$-D_{13}$	0	0	0	$-C_{22}$	0
10	0	0	0	$-A_{03}$	0	0	0	0	0	$-B_{12}$	S_{13}	$-D_{14}$	0	0	0	0
11	0	0	0	0	$-A_{04}$	0	0	0	0	0	$-B_{13}$	S_{14}	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	$-A_{10}$	0	0	0	0	S_{20}	$-D_{21}$	0	$-C_{30}$
13	0	0	0	0	0	0	0	0	$-A_{11}$	0	0	0	$-B_{20}$	S_{21}	$-D_{22}$	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$-A_{12}$	0	0	0	$-B_{21}$	S_{22}	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$-A_{20}$	0	0	S_{30}

Figura 33. Distribución de coeficientes en el sistema de ecuaciones simultáneas. Caso específico de un arreglo matricial para $N = 6$ usuarios.

V.2. PROCESO MARKOVIANO DE SOLUCION.

El punto de interés, como parte del proceso de solución, es obtener las probabilidades de ocupación de estado de cada uno de los estados que forman parte del sistema. El sistema bidimensional markoviano para esta aplicación posee un número finito de estados si el número de usuarios N es finita. El número total de estos estados está dado por [Sousa y Silvester, 1988]:

$$N_e = \left(\frac{1}{4}\right)[N(N+4) + 4 - \phi] \quad (34)$$

donde ϕ toma el valor cero si N es par, y uno si N es impar. N_e es el número de incógnitas de probabilidades de estado $p(i, j)$ a resolver en el sistema; sin embargo, el sistema requiere de una ecuación que elimine la inconsistencia iterativa producida por la dependencia cíclica entre estados. Esta ecuación es:

$$\sum_{i=0}^{N/2} \sum_{j=0}^{N-2i} p(i, j) = 1 \quad (35)$$

El sistema se resuelve por el método Gauss-Seidel de ecuaciones simultáneas para determinación de las probabilidades de ocupación de estado $p(0,0)$, $p(0,1)$... $p(N/2,0)$, con cuyos resultados se obtienen los parámetros de interés RP, CE, y CC utilizando las ecuaciones 10, 11 y 12.

V.3. SECUENCIA PROGRAMATICA.

El sistema previamente descrito requiere una generalización en términos de los parámetros i , j , y n a partir de una dimensión de red de N usuarios. La figura 34 muestra un diagrama en bloques de la secuencia de pasos de programa realizado para cálculo de RP, CE y CC en los distintos protocolos, en los que, la única diferencia radica en la rutina de cálculo de tasas de transición.

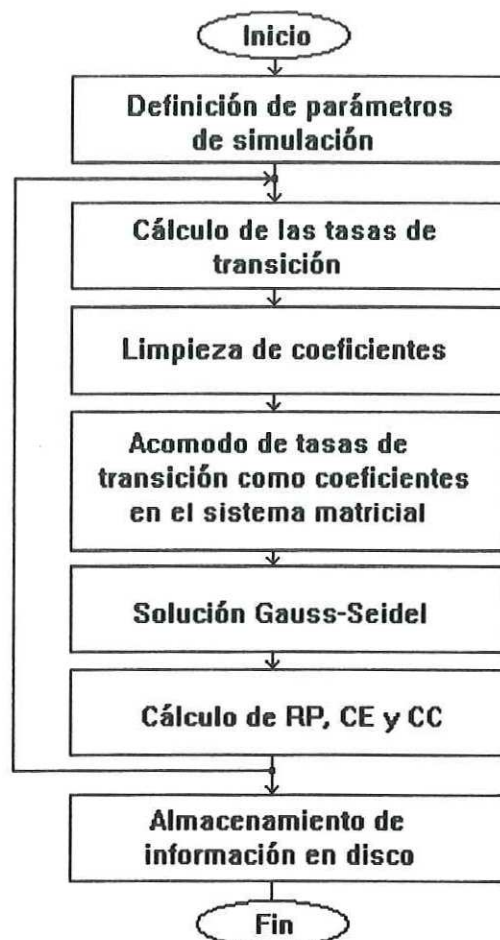


Figura 34. Diagrama en bloques de la secuencia programática requerida para la obtención de los parámetros RP, CE y CC.

La secuencia se aplica iterativamente para diferentes valores de tráfico normalizado y longitud relativa de preámbulo, por lo que se hace necesario una limpieza de los coeficientes del dimensionado matricial previo al acomodo correspondiente de las tasas de transición del mismo. El resultado es un arreglo denominado "sistema diluido", por su bajo contenido de valores numéricos distintos de cero. La rutina numérica que resuelve el sistema (Gauss-Seidel), ha sido seleccionada por su tiempo de respuesta bajo comparada con otras rutinas. Este es un punto importante en la simulación, ya que los sistemas planteados lo constituyen arreglos matriciales de dimensiones grandes que demandan gran capacidad de memoria y tiempo de procesamiento.

Finalmente se efectúa una rutina de cálculo para los parámetros de interés y el resultado se almacena en disco.

Con los resultados obtenidos, es posible obtener gráficas que muestran el comportamiento del canal ante los diversos protocolos y relativo a parámetros tales como RP, CE y CC. Las conclusiones a las cuales se llega después de observar estos resultados se describen en la siguiente sección.

V.4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

Los resultados de los protocolos "base receptor", "común transmisor" y "receptor transmisor", no son comparables en forma indiscriminada, pues las restricciones a las que se someten para efectos de cómputo no son homogéneas. La máxima compatibilidad de estas restricciones es exclusiva de los protocolos "común transmisor" y "receptor transmisor", por su semejanza de operación respecto a la longitud relativa del preámbulo. A continuación se proporciona un análisis del comportamiento del canal ante estos protocolos en base a los resultados obtenidos, seguido de una tabla comparativa de las propiedades más relevantes.

V.4.1. RETRASO PROMEDIO (RP).

El retraso promedio en función del tráfico normalizado para los tres protocolos se proporciona en número de paquetes en un segundo y que no se reciben correctamente en virtud de la saturación e interferencia del canal, lo cual da lugar a múltiples colisiones. Este parámetro proporciona herramientas para el control de tráfico, el cual puede realizarse mediante el sensado de portadora [Sousa y Silvester, 1988] y cuya aplicación depende del tipo y características de la red.

Para cada uno de los tres protocolos, el RP crece en forma proporcional con el número de usuarios y el tráfico. Esto tiene repercusión directa en la carga ofrecida por el sistema.

Para el protocolo "base receptor", en cuyo modelo no interviene la longitud relativa de preámbulo, y de acuerdo a la figura 35, este crecimiento es aproximadamente lineal con el tráfico normalizado, de manera que puede determinarse fácilmente la pendiente de la recta. Por ejemplo: para $N = 100$ y tráfico normalizado unitario, el RP es aproximadamente 70 paquetes/segundo, lo cual proporciona una pendiente aproximada $m \approx 70$. Sin embargo, no se puede aseverar lo mismo respecto a los protocolos CT y RT, puesto que el proceso de simulación para el protocolo BR no se somete a igualdad de condiciones respecto a longitud relativa del preámbulo.

Los protocolos CT y RT sometidos a condiciones iguales, presentan diferencias notorias en su retraso promedio (figuras 36 y 37). Para un valor de longitud de preámbulo $p=1\%$, carga ofrecida $\lambda/\mu = 1$ y un número de usuarios

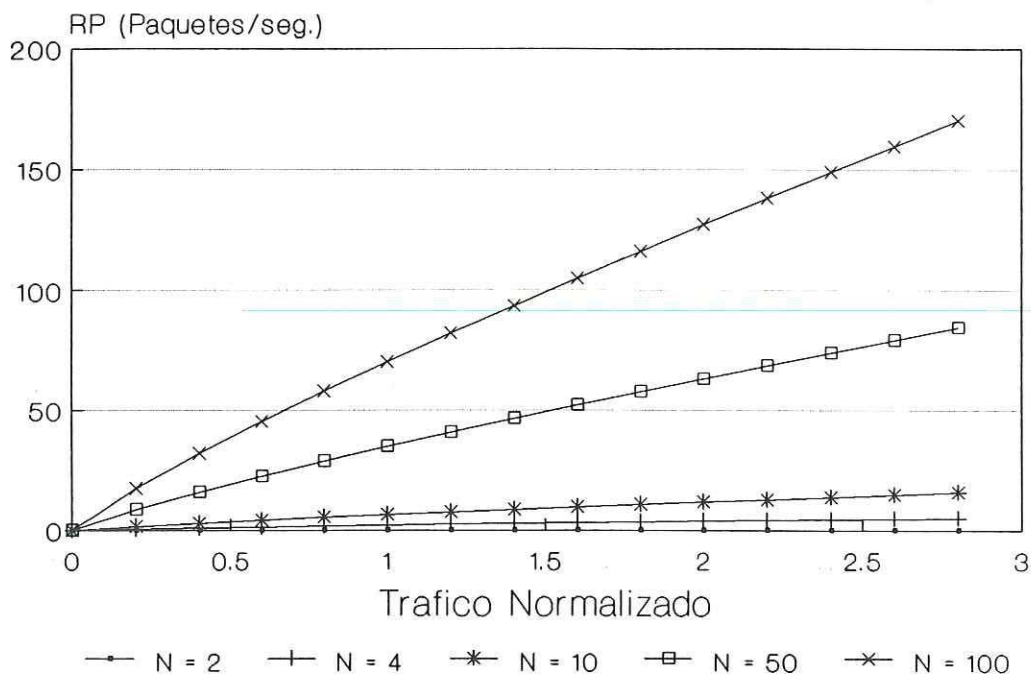


Figura 35. Retraso Promedio contra Tráfico Normalizado del protocolo Base Receptor para distintos valores de número de usuario.

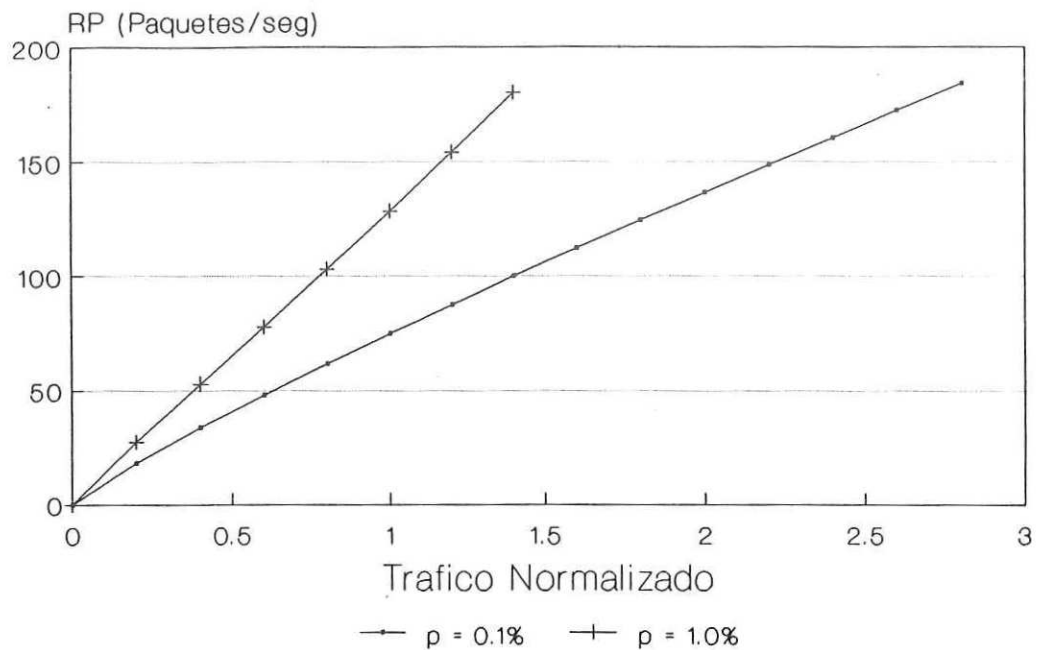


Figura 36. Retraso Promedio contra Tráfico Normalizado del protocolo Común Transmisor para distintos valores de longitud relativa de preámbulo y un número de usuarios $N = 100$.

$N=100$, el protocolo CT presenta un $RP \approx 128$ paquetes/segundo, mientras el protocolo RT solo 70 paquetes/segundo, aproximadamente la mitad del RP del protocolo CT.

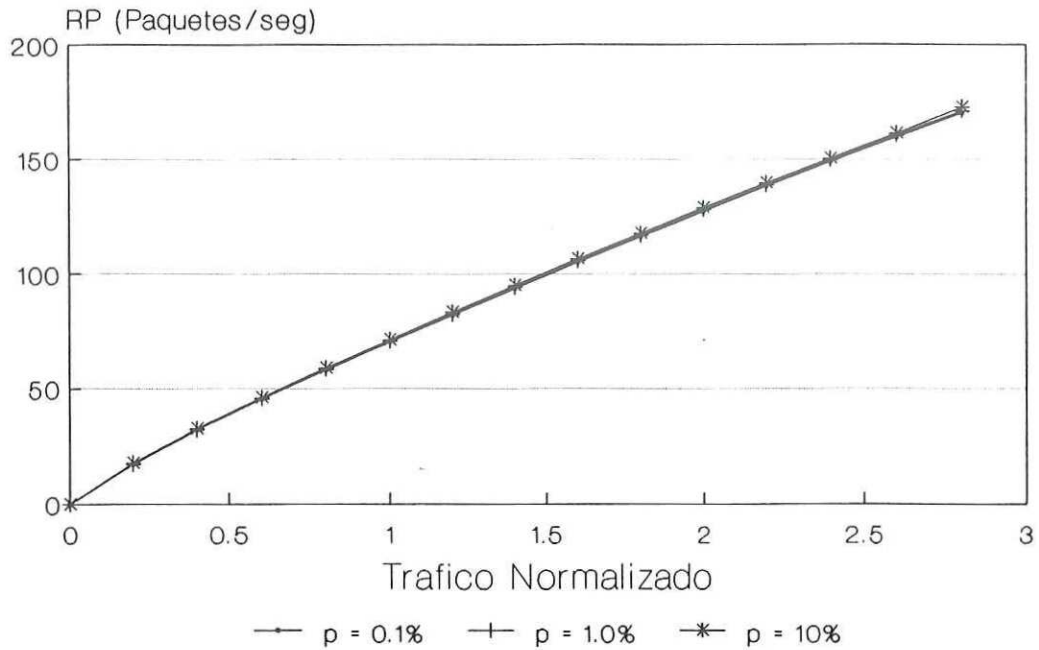


Figura 37. Retraso Promedio contra Tráfico Normalizado del protocolo Receptor Transmisor para distintos valores de longitud relativa de preámbulo y un número de usuarios $N = 100$.

Algunos resultados interesantes entre los protocolos con respecto a RP se mencionan a continuación:

- El retraso promedio del protocolo CT crece drásticamente y en forma proporcional al crecimiento de la longitud relativa de preámbulo, mientras el protocolo RT se muestra notablemente insensible a las variaciones de p .
- Cuando el número de usuarios N se incrementa (figuras 38 y 39), el RP del protocolo CT crece drásticamente, mientras que el protocolo RT presenta

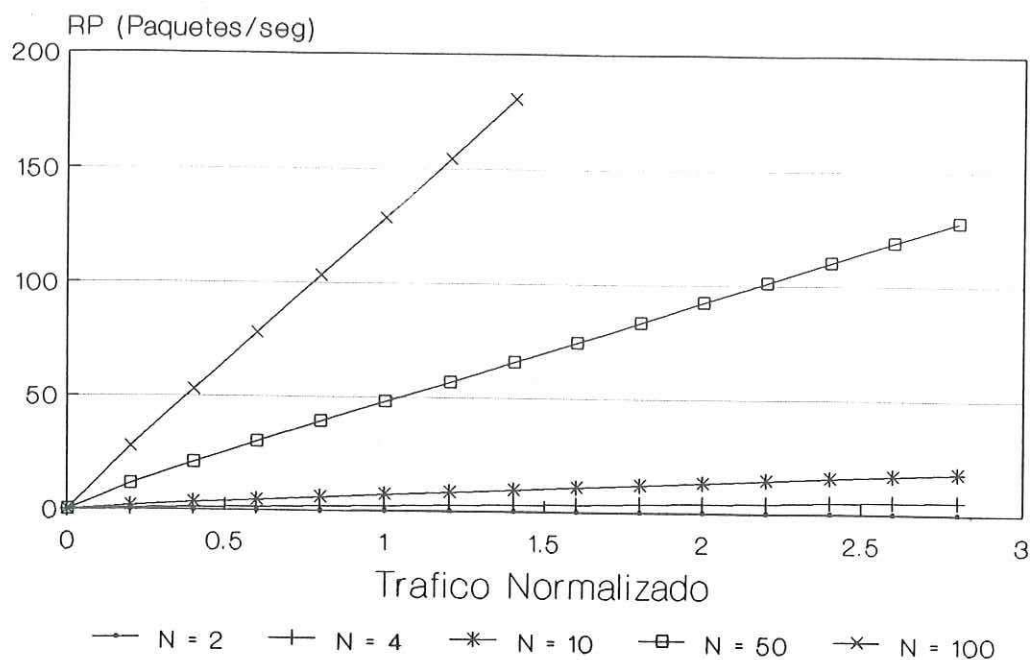


Figura 38. Retraso Promedio contra Tráfico Normalizado del protocolo Común Transmisor para distintos valores de número de usuarios y longitud relativa de preámbulo $p = 1\%$.

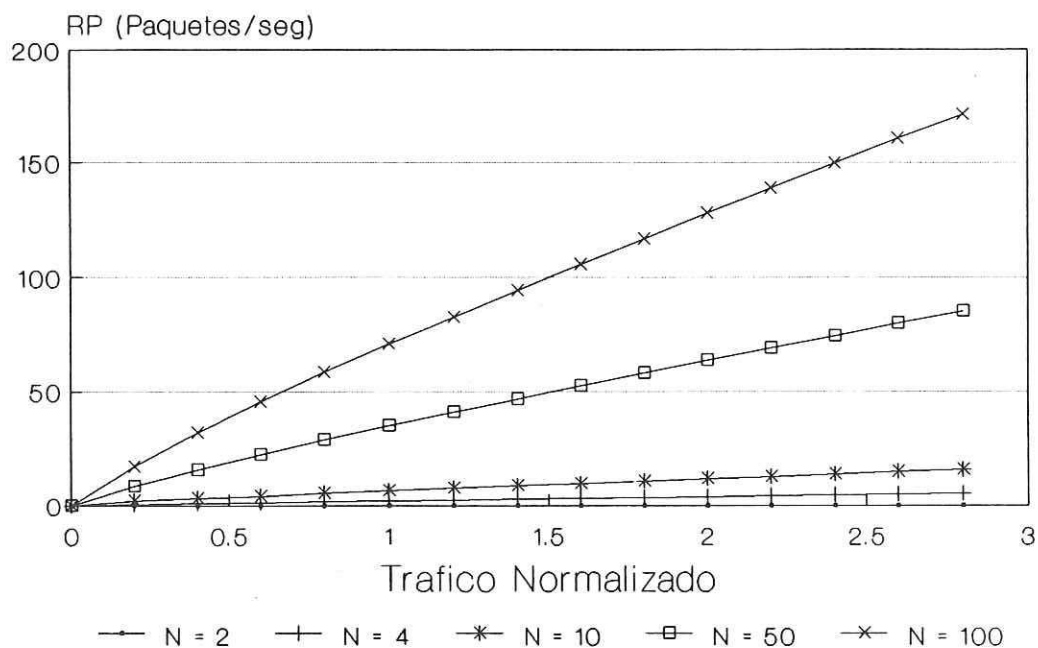


Figura 39. Retraso Promedio contra Tráfico Normalizado del protocolo Receptor Transmisor para distintos valores de número de usuarios y longitud relativa de preámbulo $p = 1\%$.

tasas de crecimiento mucho más bajas, lo cual indica similarmente, una menor sensibilidad de este último respecto al número de nodos de la red.

- El comportamiento de los protocolos BR Y RT en cuanto a RP, resulta muy similar respecto a las características de tráfico y número de usuarios en la red.

En resumen, el protocolo BR exhibe características favorables respecto a tráfico bajo, medio y alto en función del retraso promedio. El protocolo RT presenta mejor comportamiento en RP que el protocolo CT. Este último, difícilmente será adecuado a sistemas con demanda de alto tráfico.

V.4.2. CAUDAL EFICAZ.

El caudal eficaz para el protocolo BR muestra los siguientes aspectos de interés (figura 40):

- Para valores muy grandes de tráfico normalizado y un número de usuarios $N=2$, el CE tiende a la unidad, lo cual significa una explotación del canal al 100%.
- Para cantidades impares de número de usuarios, el CE es siempre menor al CE de su número par inmediato superior, independientemente del tráfico cursado. Esto es ocasionado por el bajo acoplamiento de carga del sistema en las no paridades de número de usuarios.
- El CE máximo para un número de usuarios elevado, se logra para un tráfico normalizado unitario, y se aproxima al máximo CE bajo la técnica de acceso múltiple ALOHA Ranurado (≈ 0.36).

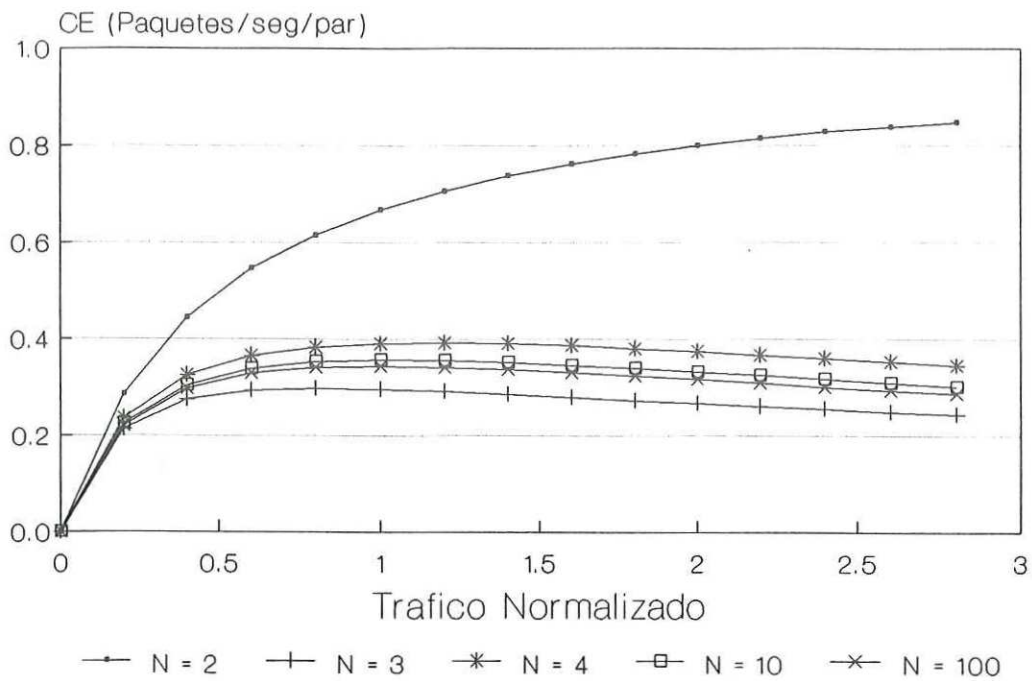


Figura 40. Caudal Eficaz contra Tráfico Normalizado del protocolo Base Receptor para distintos valores de número de usuarios.

Las figuras 41 y 42 proporcionan información sobre el CE de los protocolos CT y RT respectivamente, los cuales, bajo igualdad de condiciones de longitud relativa de preámbulo $p = 1\%$ y número de usuarios $N = 2$ son equivalentes; sin embargo, a medida que se incrementa el número de usuarios, con el protocolo CT, el caudal eficaz disminuye drásticamente, mientras que con el protocolo RT, el caudal eficaz permanece relativamente insensible, evidenciando un soporte mayor para redes de gran dimensión.

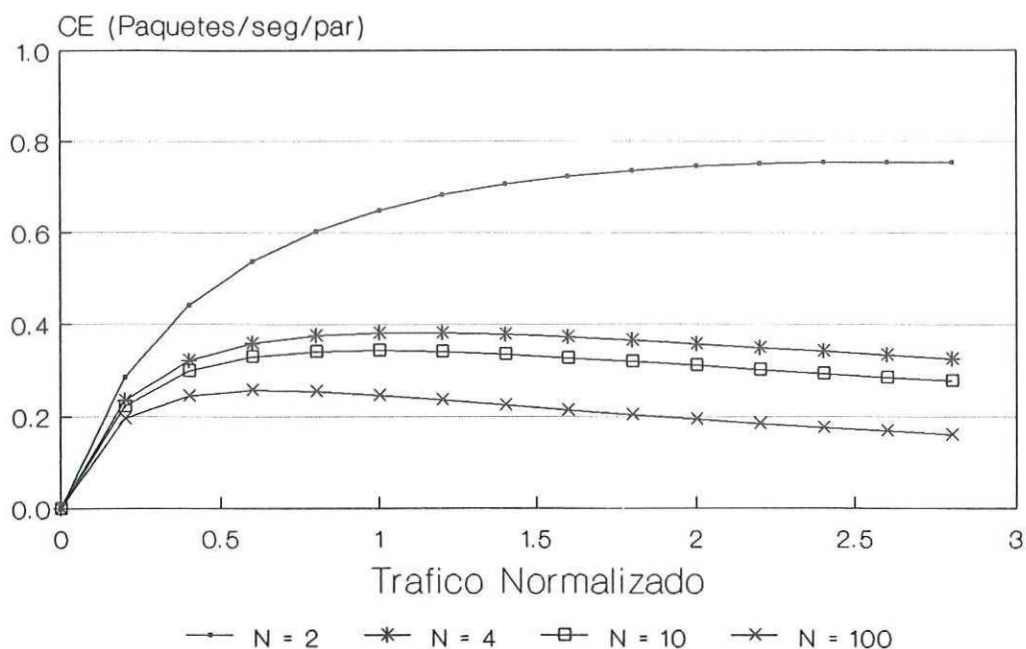


Figura 41. Caudal Eficaz contra Tráfico Normalizado del protocolo Común Transmisor para distintos valores de número de usuarios y longitud relativa de preámbulo $p = 1\%$.

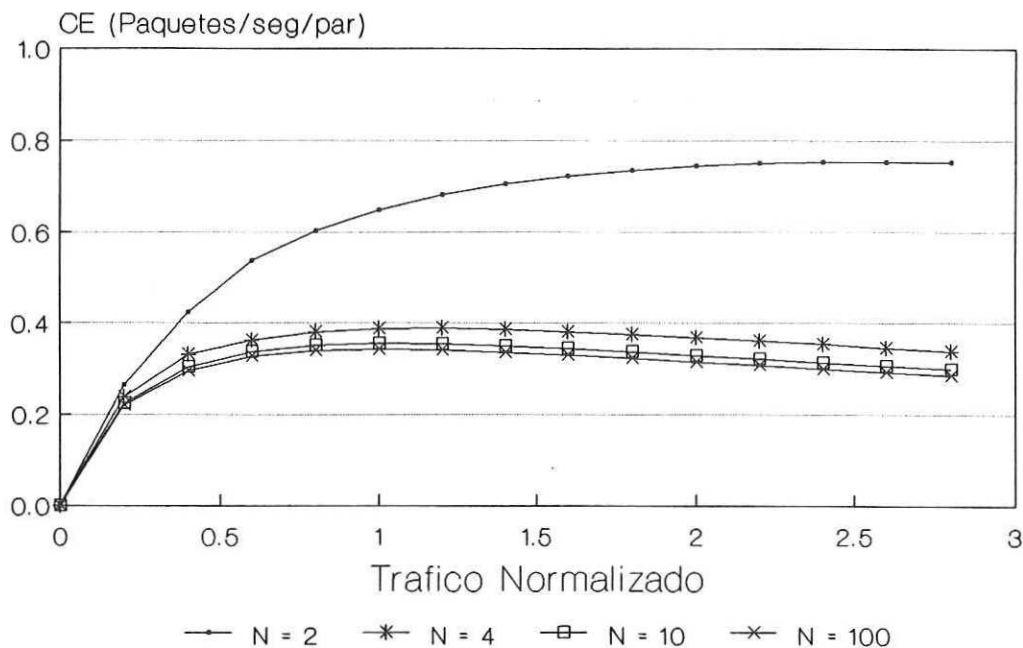


Figura 42. Caudal Eficaz contra Tráfico Normalizado del protocolo Receptor Transmisor para distintos valores de número de usuarios y longitud relativa de preámbulo $p = 1\%$.

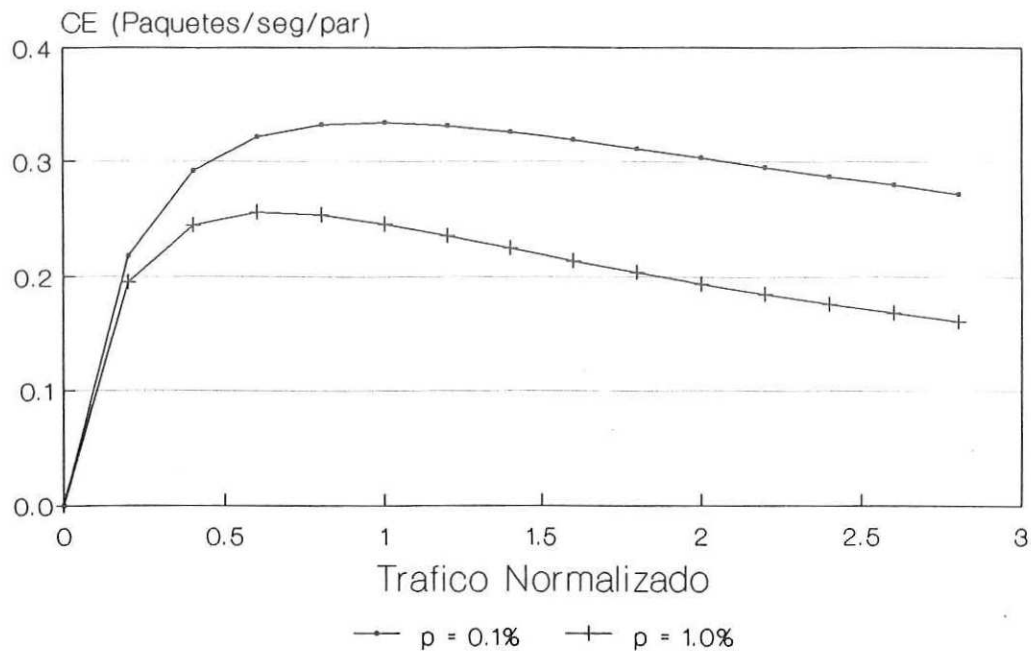


Figura 43.- Caudal Eficaz contra Tráfico Normalizado del protocolo Común Transmisor para distintos valores de longitud relativa de preámbulo y número de usuarios $N = 100$.

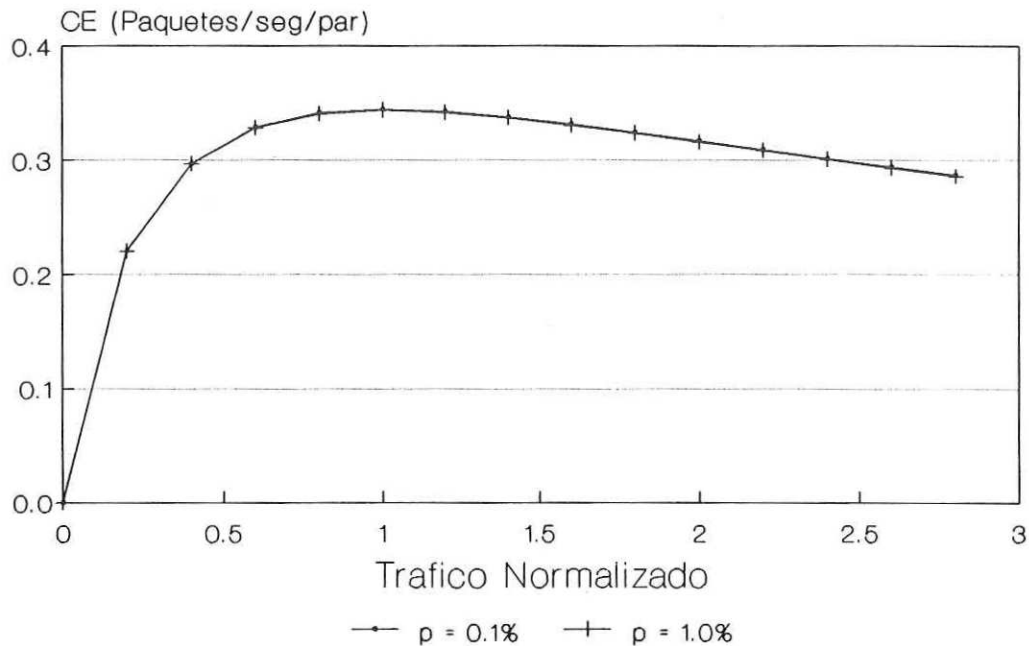


Figura 44.- Caudal Eficaz contra Tráfico Normalizado del protocolo Receptor Transmisor para distintos valores de longitud relativa de preámbulo y número de usuarios $N = 100$.

Respecto a la longitud relativa del preámbulo (figuras 43 y 44), el CE del protocolo CT decrece rápidamente conforme se incrementa p , mientras el protocolo RT se muestra aproximadamente insensible a los cambios de p .

V.4.3. ESTABILIDAD.

Una red de comunicaciones con un equipo sofisticado y un exhaustivo control de tráfico por medio de una estación maestra, puede proporcionar un punto de operación altamente estable, de manera que se obtenga en todo momento un máximo de utilidad del sistema respecto al caudal eficaz. No siempre es posible la obtención de una red con esta característica, de ahí la importancia de un estudio de estabilidad en términos prácticos.

La tabla IV muestra un breve estudio comparativo de las características más relevantes de los protocolos BR, CT y RT, y en la cual se destaca el concepto de "estabilidad" del modelo en términos de las variaciones de tráfico.

Supóngase que se desea la utilización de un canal de por lo menos a un 95% de su caudal eficaz máximo en todo momento; el resultado es un intervalo de operación de tráfico (IOT) en torno a un máximo CE y una banda operativa de tráfico (BOT), así como una área de operación (AO) bajo la curva de CE (figura 32). La estabilidad de este sistema puede medirse en términos de la BOT. Mientras más amplia es la BOT, el sistema será más estable. Sin embargo, la estabilidad del sistema no significa extraer el máximo provecho del mismo. Se requiere además que esa banda operativa proporcione una máxima área de trabajo, lo cual significa un caudal eficaz con un nivel aceptable. Los resultados mostrados en la figura 45 muestran un sesgamiento de la curva hacia la izquierda,

lo cual produce un intervalo más amplio de tráfico estable hacia el lado derecho del punto de caudal máximo, lo que demuestra que el sistema es más estable operando a valores de tráfico mayores del punto que proporciona un CE máximo. En la tabla IV se muestran además, resultados concretos de RP y CE para valores pequeños de N y valores grandes ($N=10$ Y $N=100$), para efectos comparativos de redes con demanda de carga baja y alta.

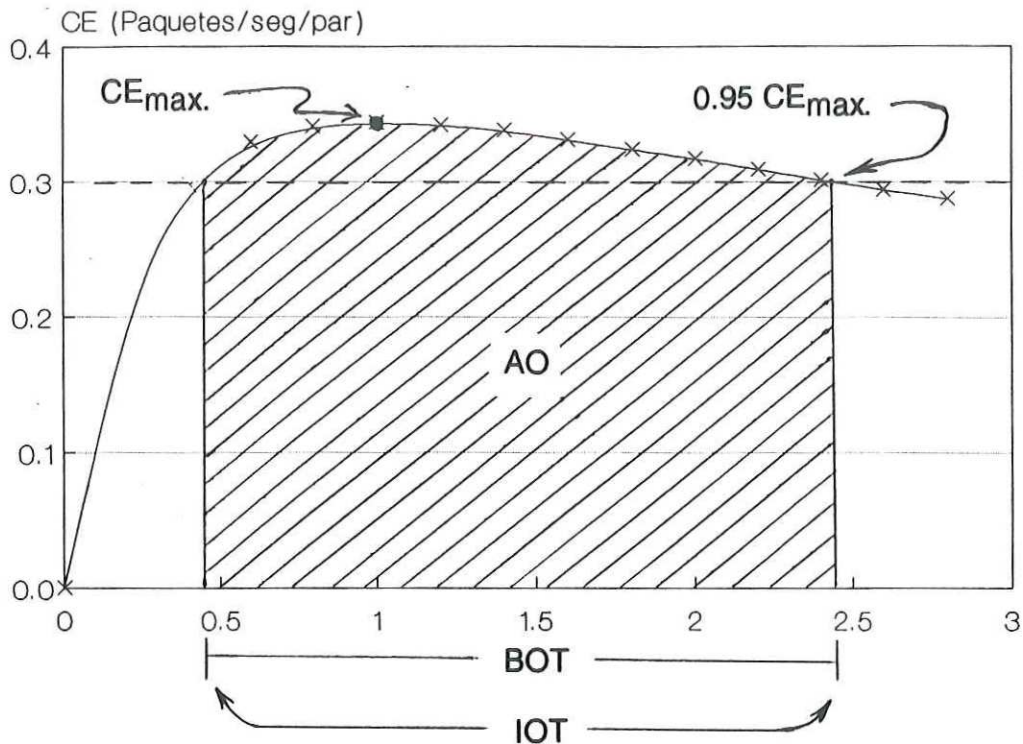


Figura 45. Características de estabilidad en una gráfica de Caudal Eficaz contra Tráfico Normalizado.

Puede observarse que los protocolos BR y RT son semejantes en estabilidad y RP; sin embargo, puede asegurarse que para una longitud relativa de preámbulo $p = 1\%$ en el protocolo RT, el AO será siempre ligeramente menor que para el protocolo BR. Para valores muy bajos de N , el protocolo CT presenta

una estabilidad aceptable y una AO ligeramente deficiente, mientras para valores grandes de N , este protocolo incurre en una notoria degradación.

Se observa que el orden de magnitud en que se incrementa N es 10. Para este crecimiento, el RP de los protocolos BR y RT es aproximadamente del mismo orden, lo cual no resulta igual para el protocolo CT, pues este manifiesta un elevado crecimiento de RP.

En resumen, los protocolos BR y RT proporcionan a la red características de mayor robustez de CE y RP respecto a los parámetros de tráfico, longitud relativa de preámbulo, estabilidad y número de usuarios. Son por tanto, una buena alternativa para implantación en un sistema real, salvo las respectivas consideraciones de complejidad y costo para un dictamen definitivo.

Tabla IV. Resumen comparativo de los protocolos BR, CT y RT en términos de RP, CE y Estabilidad.

PROTOCOLO BASE RECEPTOR		
	N = 10	N = 100
CE máximo	0.357	0.344
CE máximo X 95%	0.339	0.327
IOT	[0.6, 1.8]	[0.59, 1.72]
BOT	1.2	1.13
AO	0.421	0.399
Retraso Promedio	6.49	70.19
PROTOCOLO COMUN TRANSMISOR		
	N = 10, p = 1%	N = 100, p = 1%
CE máximo	0.343	0.256
CE máximo X 95%	0.326	0.243
IOT	[0.58, 1.6]	[0.39, 1.06]
BOT	1.02	0.67
AO	0.343	0.202
Retraso Promedio	7.00	128.37
PROTOCOLO RECEPTOR TRANSMISOR		
	N = 10, p = 1%	N = 100, p = 1%
CE máximo	0.356	0.344
CE máximo X 95%	0.338	0.327
IOT	[0.6, 1.76]	[0.59, 1.69]
BOT	1.16	1.10
AO	0.405	0.371
Retraso Promedio	6.55	70.55

VI. DISEÑO DE UNA RED CDMA.

El modelaje realizado de los protocolos CDMA respecto a tráfico, no constituye por sí misma la herramienta única y suficiente para el diseño de una red de comunicación bajo este esquema. Si bien es cierto que proporciona información sobre el dimensionamiento del sistema, no se pueden ignorar las consideraciones de elementos tales como: ancho de banda disponible, tamaño de antena, potencia y velocidad de transmisión, así como sus repercusiones en eficiencia y probabilidad de error. Es por tanto, objetivo de este capítulo, presentar un breve ejemplo de dichas consideraciones y su aplicación e importancia en el diseño.

VI.1. GENERALIDADES.

CDMA soporta elevado número de usuarios cuando se elige un protocolo adecuado, lo cual se demostró en el capítulo precedente. Con esto, se destaca la posibilidad de que un elevado número de usuarios transmitan simultáneamente utilizando el mismo recurso espectral; sin embargo, esta característica depende en gran medida de las propiedades del código empleado para ensanchar la información. Cuando la longitud del código elegido es grande, se pueden generar arreglos de secuencias identificativas con propiedades de baja autocorrelación y correlación cruzada, lo cual permite niveles de interferencia bajos en el sistema. Cuando la longitud del código es corta, la deficiencia en autocorrelación debe ser suplementada por un control de umbral de potencia, lo cual reduce fuertemente la capacidad del sistema en número de accesos simultáneos.

Se ha mencionado la gran versatilidad de Espectro Extendido y por ende, sus aplicaciones, siendo sus principales medios de transmisión la atmósfera y el espacio libre. Dos de las aplicaciones más importantes de CDMA son: Las Redes Locales de Datos Inalámbricas (WLAN's, Wireless Local Area Networks) para comunicaciones terrestres entre computadoras y las Redes de Estaciones Terrenas de Apertura Muy Pequeña (VSAT's, Very Small Aperture Terminal) para comunicaciones vía satélite de voz y datos de baja velocidad. Las condiciones y características de una red son resultado directo de la aplicación y servicios que proporciona, así como de las limitantes físicas del equipo y recursos de comunicación. Los elementos que intervienen en un cálculo de enlace en una red satelital, pueden encontrarse con detalle en múltiples referencias, por lo que a continuación se mencionan en términos generales.

La relación portadora a ruido total del sistema está dado por:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_T = \frac{1}{\frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_S} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_B} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_I}} \quad (36)$$

donde:

$\left(\frac{C}{N}\right)_S$ = Relación portadora a ruido en el enlace ascendente.

$\left(\frac{C}{N}\right)_B$ = Relación portadora a ruido en el enlace descendente.

$\left(\frac{C}{N}\right)_I$ = Relación portadora a ruido de interferencia por contribución de satélites y canales vecinos.

La relación portadora a ruido en el enlace ascendente se puede determinar con:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_S = P_{ET} + G_{ET} - L_S - L' + \left(\frac{G}{T}\right)_{SAT} - K - B_S - BO_i \quad (37)$$

y la relación portadora a ruido del enlace descendente es:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_B = P_{SAT} + G_{SAT} - L_B - L' + \left(\frac{G}{T}\right)_{ET} - K - B_S - BO_o \quad (38)$$

donde todos los elementos se expresan en decibeles y son:

P_{ET} = Potencia de transmisión de la estación terrena.

P_{SAT} = Potencia de retransmisión del satélite.

G_{ET} = Ganancia de antena de la estación terrena.

G_{SAT} = Ganancia de antena del satélite.

L_S = Pérdidas por trayectoria en el enlace ascendente.

L_B = Pérdidas por trayectoria en el enlace descendente.

L' = Pérdidas por atenuación atmosférica.

$\left(\frac{G}{T}\right)_{ET}$ = Figura de mérito de la estación terrena.

$\left(\frac{G}{T}\right)_{SAT}$ = Figura de mérito del satélite.

K = Constante de Boltzman.

B_S = Ancho de banda ocupado.

BO_i = Margen de potencia de entrada en el transpondedor.

BO_o = Margen de potencia de salida en el transpondedor.

Los puntos a considerar en este diseño estarán enfocados a una red satelital de tipo VSAT para transmisión de voz, datos e imágenes de baja velocidad.

Las características mas relevantes de una red VSAT son:

- Bajo consumo de energía en las estaciones terrenas (de 1 a 5 W).
- Diámetros de antena entre 0.3 y 2.4 m para las terminales terrenas.
- Diámetros de antena entre 3 y 9 mts. para la estación maestra.
- Bajas velocidades de transmisión (hasta 1.544 Mbps).
- Transmisión en modo paquete.
- Bajo costo de mantenimiento y operación.
- Conectividad con otras redes.

Entre las ventajas más importantes de la implantación del esquema CDMA en una red tipo VSAT, destacan las aportadas por la estructura en malla, con lo que se eliminan los saltos dobles que se requieren en una estructura tipo estrella. Esto reduce el tiempo de propagación de la señal en la transmisión en aproximadamente 0.5 segundos. Esta reducción es una gran ventaja considerando que la duración de un paquete de información es del orden de milisegundos (p.ej. un paquete de longitud 1120 bits a una velocidad de 64Kbps tiene una duración de transmisión de 17.5 ms).

VI.2. DISEÑO DE UNA TERMINAL TERRENA.

Cuando se diseña un sistema de comunicación digital, es posible adicionar ciertas características de control y confiabilidad que no son posibles en sistemas de comunicación analógicos. Uno de estos elementos es la codificación para control de errores (FEC), el cual añade redundancia a la información de forma tal que la probabilidad de error disminuye. El precio por esta disminución en los errores de bit recibidos (BER, Bit Error) es un incremento en el ancho de banda utilizado.

Este tipo de codificación es de gran importancia en sistemas de Espectro Extendido. Supóngase por ejemplo que se desea transmitir información a una velocidad de 4.8 Kbps con una tasa de codificación de $2/3$ ($FEC = 2/3$) como se muestra en la figura 46 utilizando una secuencia para ensanchar la información de longitud 1023 chips. El producto de los bits de información con la secuencia de ensanchamiento es 4.92 Mbps aproximadamente, por lo que el resultado posterior a la codificación será 7.4 Mbps por efectos de los bits redundantes.

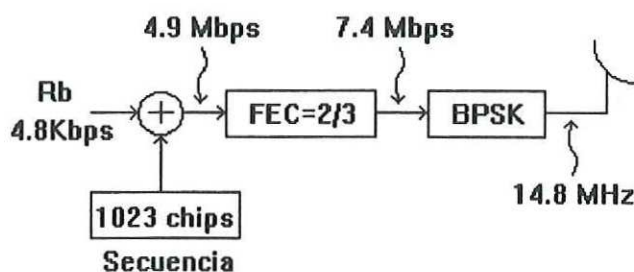


Figura 46. Efectos de multiplicación de información por secuencia y codificación.

Si se considera en este ejemplo una modulación digital de fase BPSK, la cual demanda un ancho de banda a ocupar de 2 veces la velocidad de transmisión digital a ser modulada, entonces el ancho de banda ocupado será de 14 MHz. Este ancho de banda es mayor que el ancho de banda que ocuparía la misma señal digital sin codificación (9.84 MHz).

Considerese ahora el siguiente ejemplo de diseño de enlace de una red VSAT operando en la banda Ku (14 y 12 GHz, subida y bajada respectivamente) bajo el esquema CDMA con modulación BPSK sin codificación (Tabla V), en el que el objetivo es determinar las condiciones necesarias para operar bajo el esquema de red VSAT con la técnica de acceso múltiple CDMA. Para efectos de este ejemplo, se asume la rigurosa aplicación de las características mencionadas previamente. Esto no sucede en la práctica. La filosofía de una red de este tipo radica en un buen nivel de servicio con un bajo costo de implantación y mantenimiento, así como una mínima complejidad de operación, por lo que los elementos restrictivos pasan a segundo término.

La tabla V muestra en resumen los resultados de velocidad máxima de transmisión de información R_b y el diámetro de antena requerido bajo condiciones preestablecidas. Entre dichas condiciones se encuentran la potencia de transmisión de la estación terrena y la calidad deseada de la señal en el enlace descendente $(C/N_o)_B$. A cada columna se le ha anexado una variante respecto a su precedente. Con esto, es posible enunciar las siguientes observaciones:

- La velocidad de transmisión de información R_b (columna 1), es grande para un ancho de banda de 54 MHz y longitud de código pequeña (18 chips). Sin embargo, bajo estas condiciones, el esquema no corresponde a una red VSAT, por su diámetro de antena requerido (6.5 mts.).
- Es posible reducir substancialmente el diámetro de antena requerido si se disminuye el ancho de banda en el cual se realiza la transmisión. Esto se logra disminuyendo la velocidad de transmisión de información. Sin embargo, el esquema bajo estas condiciones, no corresponde aún a una terminal terrena VSAT.
- Es posible reducir aún más el diámetro de antena requerido si se incrementa el proceso de ganancia (Longitud de secuencia). Bajo las condiciones descritas en la tercera columna, el esquema si corresponde a una red VSAT.
- Si se cuenta con las condiciones favorables para obtener la calidad de señal deseada del punto anterior, es entonces posible disponer de niveles de holgura de operación y suministrar una potencia menor a la antena incrementando su diámetro y continuar bajo el mismo esquema de red.

Tabla V. Elementos de diseño de dimensiones de antena de una estación VSAT con el esquema DS/CDMA en banda Ku con modulación BPSK sin codificación y a una probabilidad de error de 10^{-6} .

$[E_b/N_0]$ requerido (dB)	10.6			
$[C/N_0]_B$ (dB-Hz)	50			
$[C/N]_I$ Interferencia por satélites y canales vecinos (dB)	5			
$[G/T]_{SAT}$ Figura de mérito del satélite (dB)	6.2			
Distancia promedio de la E.T. al satélite (Km)	37000			
η Eficiencia de antena	75%			
L_s Pérdidas por trayectoria de enlace ascendente (dB)	206.9			
L' Pérdidas por atenuación atmosférica	0.2			
BOI (dB)	1			
Potencia de transmisión (dBW)	7	7	7	4
Ancho de banda B_s disponible (MHz)	54	27	27	27
Longitud de secuencia (chips)	18	18	64	64
R_b Velocidad de transmisión máxima (Kbps)	1500	750	210.9	210.9
$[C/N]_T$ Portadora a ruido total (dB)	-4.9	-4.9	-10.5	-10.5
$[C/N]_B$ Portadora a ruido en el enlace descendente (dB)	-27.3	-24.3	-24.3	-24.3
$[C/N]_S$ Portadora a ruido en el enlace ascendente (dB)	17.4	14.3	8.8	8.8
G_{ET} Ganancia de la E.T. (dB)	61	54.9	49.4	52.4
D Diametro de antena requerido (m)	6.5	3.2	1.7	2.4

Considerese ahora que se permite una probabilidad de error mayor (10^{-3}) y las condiciones anteriores se mantienen. Esto permite niveles de operación mas holgados, de acuerdo a la tabla VI. Sin embargo, permitir una probabilidad de error tan grande no es muy recomendable para algunos servicios, especialmente para transmisión de paquetes programáticos y transferencia de información financiera, en los que un solo bit erróneo de mensaje puede distorsionar completamente la información.

Tabla VI. Elementos de diseño de dimensiones de antena de una estación VSAT con el esquema DS/CDMA en banda Ku con modulación BPSK sin codificación y a una probabilidad de error de 10^{-3} .

(E_b/N_0) requerido (dB)	6.9
$(C/N_0)_B$ (dB-Hz)	50
$(C/N)_I$ Interferencia por satélites y canales vecinos (dB)	5
$(G/T)_{SAT}$ Figura de mérito del satélite (dB)	6.2
Distancia promedio de la E.T. al satélite (Km)	37000
η Eficiencia de antena	75%
L_s Pérdidas por trayectoria de enlace ascendente (dB)	206.9
L' Pérdidas por atenuación atmosférica	0.2
BOI (dB)	1

Potencia de transmisión (dBW)	7	7	7	4
Ancho de banda B_s disponible (MHz)	54	27	27	27
Longitud de secuencia (chips)	18	18	64	64
R_b Velocidad de transmisión máxima (Kbps)	1500	750	210.9	210.9
$(C/N)_I$ Portadora a ruido total (dB)	-8.6	-8.6	-14.2	-14.2
$(C/N)_B$ Portadora a ruido en el enlace descendente (dB)	-27.3	-24.3	-24.3	-24.3
$(C/N)_S$ Portadora a ruido en el enlace ascendente (dB)	13.6	10.6	5.1	5.1
G_{ET} Ganancia de la E.T. (dB)	57.3	51.5	45.7	48.7
D Diametro de antena requerido (m)	4.2	2.1	1.1	1.6

Dado que longitudes de secuencia muy cortas producen bajos niveles en proceso de ganancia y bajos márgenes de interferencia (28), para mejorar la calidad de la señal, será necesario utilizar algunas herramientas complementarias de comunicación. Ejemplos de algunos de estos elementos son:

- Utilización de un mayor número de dimensiones en la modulación.
- Consideración de circuitos de activación de voz para el caso de telefonía digital vía satélite.
- Utilización de códigos de control de error (FEC), lo cual disminuye la probabilidad de error pero incrementa el ancho de banda demandado.

- Paquetización de información con códigos polinomiales de redundancia cíclica para el caso específico de datos, con lo que se disminuye la probabilidad de error pero se reduce significativamente el Caudal Eficaz de la información.
- Control de umbral por medio de una Estación Terrena Maestra para reducir el número de colisiones y la interferencia bajo condiciones de alto tráfico.

VI.3. CAPACIDAD DEL SISTEMA.

En el diseño de una red de comunicación no puede omitirse el aspecto de capacidad del sistema. Dicha capacidad puede referirse en términos del número máximo de usuarios de la red, número máximo de accesos simultáneos al canal de comunicación, máxima eficiencia espectral, tráfico máximo, etcétera.

Un ejemplo de estas consideraciones se describe a continuación:

Supóngase una transmisión sin codificación con el protocolo BR de DS/CDMA y con modulación BPSK. La utilización del canal de comunicación se realiza para un chip de código por cada 2 Hz de banda disponible.

Considérense ahora los resultados de la segunda columna de la tabla VI, con la cual se logra obtener una velocidad máxima de transmisión de información de $R_b = 750$ Kbps. Un paquete de información de longitud de 1120 bits requiere 1.5 ms para su transmisión, por lo que es posible transmitir 666 paquetes/segundo. El número de nodos en una red satelital con tales condiciones puede obtenerse con la ecuación 11 para $CC=666$ paquetes/s y $CE=0.344$, el resultado será $N=3872$ nodos.

La capacidad del sistema respecto a número de usuarios deberá considerar por lo tanto la carga de tráfico que cada nodo o estación representan para la red y que en conjunto no excedan este valor de umbral. Este ejemplo se ha derivado de la utilización de una secuencia extremadamente corta que arroja como resultado la posibilidad de transmitir a una velocidad elevada, pero el número de códigos útiles es reducido.

VI.4. CONCLUSIONES.

Los elementos que intervienen en el diseño de una red satelital son numerosos. Entre ellos se pueden destacar los aspectos técnicos: ancho de banda disponible, velocidad mínima de transmisión para una aplicación específica, niveles de interferencia permitidos, potencia de transmisión y diámetro de antena. En particular para CDMA es necesario considerar algunos otros aspectos como: longitudes de secuencia y tipo de generadores, esquema de transmisión (DS/CDMA, FH/CDMA, TH/CDMA, etcétera), tipo de protocolo y tipo de modulación, topología de la red, etcétera.

Otros aspectos que no dejan de tener importancia en el diseño de una red de comunicación son de tipo socio-económicos, y los cuales deben ser estudiados con detenimiento para una aplicación regional. Sin embargo, dado que la complejidad y costo del equipo transmisor - receptor del esquema CDMA respecto a otros esquemas no es significativa, puede señalarse que representa una buena opción para mejorar los servicios de comunicaciones satelitales en México.

VII. CONCLUSIONES.

VII.1. PROBLEMAS ENFRENTADOS Y SOLUCIONES.

En el desarrollo del presente trabajo, se abordaron los siguientes puntos:

a). conceptualización y b). desarrollo de la simulación.

a). Abordamiento conceptual.

Se presentó un panorama general de las distintas técnicas de acceso múltiple que se aplican en sistemas de comunicación vía satélite, entre las cuales, se enmarcó con mayor profundidad la técnica CDMA y sus diferentes modalidades. El problema esencial en dicho punto, es la reducida cantidad de trabajos bibliográficos y artículos de divulgación que tocan con adecuada profundidad el tema de: comportamiento del canal de comunicación. Existe una alta incidencia de trabajos enfocados a detectabilidad de Espectro Extendido y probabilidad de error en términos de potencia de transmisión y recepción. Sin embargo, de dichos trabajos se adoptó un modelo basado en un sistema de cadenas de Markov, que, aunque deja fuera de consideración algunos puntos importantes como tipo de código, generación, potencia de transmisión y ancho de banda, el modelo es apropiado para identificar con claridad las repercusiones de aplicación de CDMA en el canal de un sistema de comunicación respecto a tráfico.

b). Desarrollo de la simulación.

Originalmente, se planteó la posibilidad de realizar la simulación del modelo matemático en un paquete programático capaz de generar, organizar y graficar sus resultados. Sin embargo, los paquetes existentes de programación no dieron cobertura a las exigencias de dicho modelo, por lo que se abordó la realización de un programa específico para tal aplicación. Dicha aplicación se realizó en lenguaje "C" en ambiente UNIX, por la demanda dimensional de memoria y consumo de tiempo de procesamiento, por lo que se hizo necesario conocer algunos rasgos distintivos de dicho ambiente. Cabe señalar que los resultados de dichos paquetes son distintos archivos de datos, los cuales se procesaron por separado para la obtención de las graficas correspondientes. La segmentación de dichos resultados obedece a las continuas interrupciones del programa en ambiente de red, ya que los programas de corrida autónoma pueden ser fácilmente afectados por las caídas de red y la acción voluntaria o involuntaria de otros usuarios.

VII.2. CONCLUSIONES.

Esta sección resume algunos puntos ya señalados a lo largo de los capítulos anteriores y presenta además un panorama general de CDMA como técnica de acceso al satélite respecto a los esquemas descritos en el capítulo II.

VII.2.1. CONCLUSIONES DE LOS PROTOCOLOS DE CDMA.

- El protocolo Común Transmisor es fácilmente degradable con respecto al número de usuarios, por lo que no es apropiado para redes con demanda de tráfico medio y alto.
- El protocolo Receptor Transmisor tiende a ser insensible a las variaciones de su longitud relativa de preámbulo, pero si presenta ligeras muestras de degradación conforme se incrementa el número de usuarios.
- Los protocolos Base Receptor y Receptor Transmisor son muy semejantes en comportamiento, mostrando ambos una sensibilidad relativamente baja con respecto a las variaciones de tráfico, por lo que resultan ser los más apropiados para manejo de redes de alto tráfico.
- La utilización del canal de comunicación con los protocolos BR y RT es 34.4% para un número elevado de usuarios, por lo que la capacidad de tráfico es baja respecto al 100% del recurso disponible.

VII.2.2. CONCLUSIONES DE CDMA RESPECTO A OTROS ESQUEMAS.

- La Caudal Eficaz de los protocolos BR y RT de CDMA con un número de usuarios $N \geq 10$, es aproximadamente igual a la Caudal Eficaz de un esquema ALOHA Ranurado ($CC \approx 36\%$).

- Los esquemas TDMA y ALOHA Ranurado Adaptable mejoran substancialmente las características de Caudal Eficaz con respecto a CDMA. Sin embargo, esto no indica que la capacidad de estos esquemas mejoren la Capacidad del Canal frente al esquema CDMA.
- El precio que hay que pagar por la implantación de CDMA en lugar de alguno de los esquemas convencionales es un ancho de banda más grande, pero se obtiene una red más versátil que demanda menor control y proporciona un soporte elevado de usuarios.
- Una longitud de secuencia corta reduce fuertemente el ancho de banda demandado por el esquema CDMA, pero se incide en un número de usuarios muy bajo y una Probabilidad de Error muy alta.
- La aplicación de transmisión de video vía satélite con la técnica CDMA queda supeditada a la utilización de grandes anchos de banda aún con secuencias cortas, lo cual limita el número de accesos simultáneos (canales). Sin embargo, la utilización de esta técnica si es recomendable para voz, datos e imágenes fijas, así como en la aplicación de los diversos servicios terrestres y móviles de comunicaciones en territorio mexicano e internacional.

VII.3. APORTACIONES.

- Descripción de la operación de las distintas modalidades de Espectro Extendido.
- Análisis comparativo de las ventajas y desventajas de CDMA contra otras técnicas de acceso múltiple.
- Análisis comparativo de esquema DS/CDMA en función del Comportamiento del Canal de comunicación contra otras técnicas de acceso múltiple.
- Elaboración de un programa de cálculo de comportamiento del canal en términos de tráfico normalizado para el esquema DS/CDMA.
- Simulación programática de los protocolos BR, CT y RT de la técnica de acceso múltiple DS/CDMA y análisis de los resultados obtenidos.
- Planteamiento de las bases de diseño para una red bajo la técnica de Espectro Extendido en términos de ancho de banda, velocidad y potencia de transmisión, número de usuarios, longitud de secuencia y tipo de protocolo.
- Planteamiento de los elementos que pueden atenuar las deficiencias del esquema DS/CDMA.

VII.4. RECOMENDACIONES PARA POSIBLES TRABAJOS FUTUROS.

- Desarrollar la circuitería necesaria para el esquema más simple de Espectro Extendido (DS/CDMA) con soporte programático, para simulación inmediata de los distintos protocolos en redes VSAT para soportes de bajo tráfico.
- Analizar con mayor profundidad los esquemas más complejos de CDMA (FH/CDMA, TH/CDMA, TH/FH/CDMA, SFH/CDMA, FFH/CDMA y otras modalidades) con objeto de extender el campo de opciones para una mejor alternativa de aplicación en redes de comunicación en México.
- Realizar el modelaje para un esquema DS/CDMA ranurado, con lo cual podrá determinarse si la técnica de espectro extendido con dicha modalidad bajo condiciones semejantes mejora las propiedades del esquema modelado en este trabajo.
- Realizar el modelaje para una distribución de arribo binomial para comparación directa con los resultados obtenidos en este trabajo y el cual se realizó para una distribución de arribo de Poisson.
- Realizar un análisis profundo de las distintas familias de generadores de secuencias, determinando sus propiedades y su aplicación en la técnica de acceso múltiple CDMA.

- Realizar el diseño de una red considerando los elementos que mejoran las condiciones generales de operación del enlace satelital (Detección de nivel de tráfico por medio de una estación central de control, Aplicación del Código de Corrección de Errores FEC, activación de voz, etcétera).
- Realizar el análisis de factibilidad de aplicación de CDMA en comunicaciones móviles a través de los Satélites Solidaridad con los elementos mencionados en el parrafo anterior.

LITERATURA CITADA

- Chen, X. H. y Oksman, J. 1991. New Collision Channel Model for Packet - Switched CDMA Networks. *Electronics Letters*. 27(20). 1792-1793.
- Corona Dominguez, Manuel. 1991. Especificación de Protocolos para Transmisión de Datos Vía Satélite. Tesis de Maestría. C.I.C.E.S.E. División de Física Aplicada DET.
- Dixon, Robert C. 1984. *Spread Spectrum System*. John Wiley & Sons. New York. 422 pp.
- Gagliardi, R. M. 1984. *Satellite Communications: an Introduction*. Van Nostrand Reinhold Company. New York. 474 pp.
- Gilhousen, Klein S., Jacobs, Irwin M., Padovani, Roberto y Weaver, Lindsay A. Jr. 1990. Increased Capacity Using CDMA for Mobile Satellite Communication. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 8(4). 503-514.
- Ha, Tri T. 1986. *Digital Satellite Communications*. Macmillan Publishing Company. New York. 574 pp.
- Pickholtz, Raymond L., Schilling, Donald L., y Milstein, Laurence B. 1982. Theory of Spread - Spectrum Communications -- A Tutorial. *IEEE Transactions on Communications*. 30(5). 855-884.
- Pursley, Michael B. 1987. The Rol of Spread Spectrum in Packet Radio Networks. *Proceedings of the IEEE*. 75(1). 116-134.
- Sousa, Elvino S. y Silvester, John A. 1988. Spreading Code Protocols for Distributed Spread - Spectrum Packet Radio Networks. *IEEE Transactions on Communications*. 36(3). 272-281.
- Spilker J. J. Jr. 1977. *Digital Communications by Satellite*. Prentice - Hall, Inc. New Jersey. 672 pp.

GLOSARIO

A continuación se resumen los términos y conceptos más representativos del vocabulario técnico aplicado a los sistemas de comunicación descritos en el presente trabajo.

Atenuación -

Proceso de reducción de amplitud de una señal analógica.

Autocorrelación -

Resultado del producto de una señal desplazada en el tiempo consigo misma.

Bit -

Unidad binaria mínima digital.

Capacidad del Canal -

Máximo rendimiento del canal de comunicación bajo condiciones ideales de operación.

Caudal Eficaz -

Razón de paquetes correctamente recibidos a paquetes enviados.

Chip -

Unidad binaria mínima de código digital.

Circuitería -

Entidad física de procesamiento eléctrico - electrónico.

Código -

Conjunto secuencial de unidades binarias mínimas (chips) de longitud definida.

Colisión -

Traslape destructivo de paquetes de información que hace imposible la realización del enlace de comunicación.

Correlación -

Resultado del producto de dos señales con desplazamiento en el eje del tiempo.

GLOSARIO (Continuación)

Eficiencia -

Valor relativo del aprovechamiento efectivo del sistema de comunicación.

Espectro -

Gama de frecuencias contenidas en una señal.

Ganancia -

Valor relativo de una señal resultante de un proceso con respecto a una señal de entrada inicial al proceso.

Interferencia -

Efectos no deseados en la señal de comunicación por contribución señales espectralmente próximas.

Intermodulación -

Efectos de distorsión de la señal de comunicación como resultado del proceso de modulación y/o demodulación.

Mensaje -

Información efectiva en el proceso de comunicación.

Ortogonal -

Señal cuyo producto directo con respecto a otra señal es cero.

Paquete -

Conjunto de bits de información en un arreglo para transmisión, en la cual se incluyen los bits adicionales de control y direccionamiento.

Portadora -

Señal analógica requerida para transportar los mensajes desde un la fuente (transmisor) hasta su destino (receptor).

Postámbulo -

Secuencia terminal de bits en un paquete de información.

Potencia -

Energía instantánea con que se alimenta a un transmisor para su operación.

Preámbulo -

Secuencia inicial de bits (encabezado) en un paquete de información.

GLOSARIO (Continuación)

Programática -

Secuencia de instrucciones ejecutadas por un lenguaje de cómputo.

Protocolo -

Forma de paquetización del mensaje a transmitir.

Recepción -

Proceso de recobro de portadora para demodulación y decodificación de un paquete de información.

Retraso Promedio -

Tiempo medido desde la transmisión inicial del paquete hasta que se lleva a cabo una transmisión exitosa.

Técnica -

Forma de realizar el proceso transmisión - recepción en los sistemas de comunicación.

Tráfico -

Densidad de flujo de mensajes por unidad de tiempo.

Trama -

Conjunto formado por los paquetes de información de todas estaciones que integran una red de comunicación.

Transmisión -

Proceso de codificación y modulación de un mensaje para su envío a un nodo destino.

Transpondedor -

Canal satelital (segmento de frecuencia) disponible para la realización de la comunicación.

Umbral -

Referencia del nivel de potencia para decisión del valor binario que le corresponde a una señal analógica de arribo y representarla en forma digital.

GLOSARIO DE ABREVIATURAS

BPSK -

Binary Phase Shift Keying = Modulación Digital por Corrimiento de Fase en dos Dimensiones.

CDMA -

Code Division Multiple Access = Acceso Múltiple por División de Código.

CSMA -

Carrier Sense Multiple Access = Acceso Múltiple con Sensado de portadora.

DAMA -

Demand Assigned Multiple Access = Acceso Múltiple con Asignación por Demanda.

DS/CDMA -

Direct Sequence Code Division Multiple Access = Acceso Multiple por División de Código en Secuencia Directa.

FDM -

Frequency Division Multiplexed = Multicanalización por División de Frecuencia.

FDMA -

Frequency Division Multiple Access = Acceso Múltiple por División de Frecuencia.

FEC -

Forward Error Control = Codificación para Control de Errores.

FFH/CDMA -

Fast Frequency Hopping Code Division Multiple Access = Acceso Múltiple por División de Código con Saltos Rápidos en Frecuencia.

GLOSARIO DE ABREVIATURAS (Continuación)

FM -

Frequency Modulation = Modulación de Frecuencia.

FH/CDMA -

Frequency Hopping Code Division Multiple Access = Acceso Múltiple por División de Código con Saltos en Frecuencia.

FSK -

Frequency Shift Keying = Modulación Digital por Corrimiento de Frecuencia.

PCM -

Pulse Code Modulation = Modulación por Pulsos Codificados.

PSK -

Phase Shift Keying = Modulación Digital por Corrimiento de Fase.

SCPC -

Single Channel Per Carrier = Canal Unico por Portadora.

SFH/CDMA -

Slow Frequency Hopping Code Division Multiple Access = Acceso Múltiple por División de Código con Saltos Lentos en Frecuencia.

SPADE -

Single-Channel-Per-Carrier Pulse-Code-Modulation Multiple Access Demand Assignment Equipment = Equipo de Asignación por Demanda de Acceso Múltiple con Codificación de Pulsos Modulados en Canal Unico por Portadora.

TDMA -

Time Division Multiple Access = Acceso Múltiple por División de Tiempo.

TH/CDMA -

Time Hopping Code Division Multiple Access = Acceso Múltiple por División de Código con Saltos en Tiempo.

GLOSARIO DE ABREVIATURAS (Continuación)

TH/FH/CDMA -

Time Hopping and Frequency Hopping Code Division Multiple Access = Acceso Múltiple por División de Código con Saltos en Tiempo y en Frecuencia.

VSAT -

Very Small Aperture Terminal = Terminal de Apertura Muy Pequeña.

WLAN -

Wire less Local Area Network = Red Local de Datos Inalámbrica.