

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



**FACTIBILIDAD DEL CAMBIO DEL SISTEMA ANALÓGICO AMPS DE
TELEFONÍA CELULAR DE GUATEMALA A UN SISTEMA DIGITAL
CDMA**

**PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA**

POR

ROBERTO CARLOS MOLINA MEZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 1999

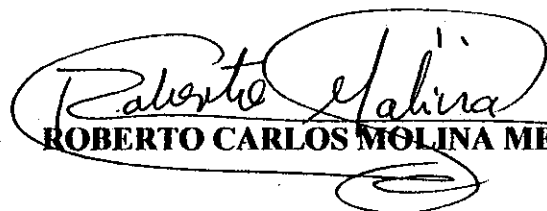


HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

FACTIBILIDAD DEL CAMBIO DEL SISTEMA ANALÓGICO AMPS DE TELEFONÍA CELULAR DE GUATEMALA A UN SISTEMA DIGITAL CDMA

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha 16 de marzo de 1999.


ROBERTO CARLOS MOLINA MEZA

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	ING. HERBERT RENÉ MIRANDA BARRIOS
VOCAL 1ro.	ING. JOSÉ FRANCISCO GÓMEZ RIVERA
VOCAL 2do.	ING. CARLOS HUMBERTO PÉREZ RODRÍGUEZ
VOCAL 3ro.	ING. JORGE BENJAMIN GUTIÉRREZ QUINTANA
VOCAL 4to.	Br. OSCAR STUARDO CHINCHILLA GUZMÁN
VOCAL 5to.	Br. MAURICIO ALBERTO GRAJEDA MARISCAL
SECRETARIA.	INGA. GILDA MARINA CASTELLANOS BAIZA DE ILLESCAS

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	ING. HERBERT RENÉ MIRANDA BARRIOS
EXAMINADOR	ING. JULIO CÉSAR SOLARES PEÑATE
EXAMINADOR	ING. LUIS ALFONSO MURALLES CALDERÓN
EXAMINADOR	ING. GUSTAVO BENIGNO OROZCO GODÍNEZ
SECRETARIA	INGA. GILDA MARINA CASTELLANOS BAIZA DE ILLESCAS



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 19 de julio de 1,999

Señor Coordinador
Ing. Julio César Solares Peñate
Area de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

Estimado Ingeniero Solares.

Me permito dar aprobación al trabajo de tesis desarrollado por el señor Roberto Carlos Molina Meza, carnet No. 94-15461 en la carrera de Ingeniería Electrónica, titulado: Factibilidad del cambio del sistema analógico AMPS de telefonía celular de Guatemala a un sistema digital CDMA.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,


Ing. Enrique B. Ruiz Carballo
ASESOR

EERC/sdem.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 23 de agosto de 1,999

Señor Director
Ing. Roberto Urdiales Contreras
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

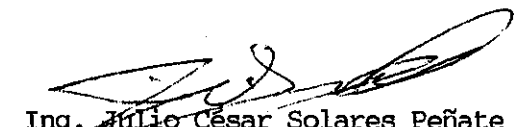
Señor Director.

Me permito dar aprobación al trabajo de tesis titulado: Factibilidad del cambio del sistema analógico AMPS de telefonía celular de Guatemala a un sistema digital CDMA, desarrollado por el señor Roberto Carlos Molina Meza, por considerar que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador Area de Electrónica

JCSP/sdem.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



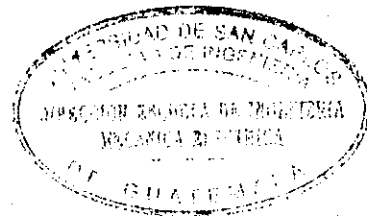
FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Area, al trabajo de tesis del estudiante Roberto Carlos Molina Meza, titulada: Factibilidad del cambio del sistema analógico AMPS de telefonía celular de Guatemala a un sistema digital CDMA, procede a la autorización del mismo.

Ing. Roberto Urdiales Contreras

Director

Guatemala, 20 de septiembre de 1,999.



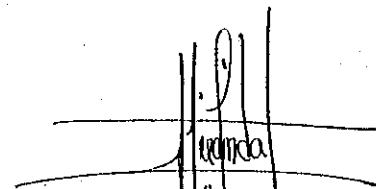
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA

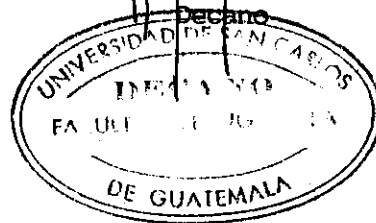


FACULTAD DE INGENIERIA

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de tesis: Factibilidad del cambio del sistema analógico AMPS de telefonía celular de Guatemala a un sistema digital CDMA, del estudiante Roberto Carlos Molina Meza, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:


Ing. Herbert René Miranda Barrios



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IV
GLOSARIO.....	VI
INTRODUCCIÓN.....	IX
1. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA CDMA	
1.1 ¿Qué es CDMA?.....	1
1.2 Técnicas de acceso múltiple.....	4
1.3 Sistemas "Spread-Spectrum".....	9
1.4 Capacidad contra sabotajes.....	10
1.5 Operación en un ambiente "Multipath".....	12
2. CONCEPTOS BÁSICOS DEL SISTEMA CELULAR	
2.1 Introducción al sistema celular.....	16
2.2 Estructura del sistema celular analógico.....	17
2.3 Elementos del sistema celular.....	20
2.4 Reutilización de frecuencias.....	21
2.5 Reducción de la interferencia co-canal.....	23
2.6 Relación de portadora a interferencia C/I.....	24
2.7 Mecanismos de "Handoff".....	24
2.8 División de celdas.....	26
2.9 Administración de la frecuencia y asignación de canales.....	26
2.10 Central de conmutación en el sistema celular analógico.....	28
2.11 Enlace de datos para la MTSO.....	29
2.12 Capacidad máxima del sistema celular AMPS.....	31
3. ESTÁNDARES IS-95	
3.1 Coordinación de tiempo y frecuencia.....	34

3.2	Frecuencias y bandas utilizadas en sistemas celulares.....	35
3.3	Manejo de tiempo dentro del estándar IS-95.....	36
3.4	Descripción del enlace hacia abajo o “forward”.....	38
3.5	Esquema de multiplexación ortogonal.....	39
3.6	Canales del enlace “forward”.....	41
3.6.1	Canal piloto y su código PN.....	43
3.6.2	Canal de sincronía.....	44
3.6.3	Canales de búsqueda.....	46
3.6.4	Canales de tráfico.....	47
3.7	Descripción del enlace de reversa.....	48
3.7.1	Esquema de acceso múltiple.....	50
3.7.2	Canales del enlace de reversa.....	50
3.7.3	Canal de acceso.....	51
3.7.4	Canales de tráfico.....	51
3.7.5	Control de potencia.....	52
3.7.6	Control de potencia en el enlace “forward”.....	54
3.8	Manejo de la capacidad y funcionamiento óptimo del sistema CDMA.....	55

4. FUNCIONES WALSH Y LOS CÓDIGOS CRC

4.1	Funciones Walsh.....	58
4.2	Matrices Hadamard.....	61
4.3	Detección de errores por el método polinomial o de comprobación por redundancia cíclica (CRC).....	62
4.4	Corrección de errores.....	67
4.5	Códigos Hamming.....	72
4.6	Arquitectura del sistema CDMA.....	75

**5. ANÁLISIS DE FÁCTIBILIDAD EN LA IMPLEMENTACIÓN
DE UN SISTEMA CDMA SOBRE LA ESTRUCTURA DE UN SISTEMA
AMPS**

5.1	Justificación.....	80
5.2	Análisis de factibilidad.....	86
5.2.1	Análisis de mercado.....	86
5.2.2	Requerimientos de personal.....	87
5.2.3	Requerimientos de maquinaria.....	87
5.2.4	Sistema de transporte.....	87
5.2.5	Monto pormenorizado de la inversión.....	88
5.2.6	Capital necesario para la realización del proyecto.....	88
5.3	Cálculo de costos.....	89
5.4	Procedimiento que se debe seguir en la realización del proyecto.....	95
	CONCLUSIONES.....	97
	RECOMENDACIONES.....	99
	BIBLIOGRAFÍA.....	100

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

<i>No.</i>	<i>Título</i>	<i>Página</i>
1	Acceso múltiple por división de frecuencia	5
2	Acceso múltiple por división de tiempo	6
3	Acceso múltiple por división de códigos	6
4	Utilización de frecuencias en cada técnica de acceso múltiple	8
5	Aplicación de "Spread-Spectrum" a una señal	10
6	Proceso de la señal en "Spread-Spectrum"	11
7	Esquema simplificado del sistema celular	16
8	Utilización de un mismo canal en dos celdas distintas	21
9	Patrón de reutilización de frecuencias	22
10	Mecanismo de "Handoff"	25
11	Esquema de una central de conmutación	28
12	Esquema del sistema celular IS-95	32
13	Enlaces de comunicación en el sistema IS-95	33
14	Espectro de frecuencias celulares	35
15	Inicio de una secuencia de código PN	37
16	Asignación de canales dentro del estándar IS-95	40
17	Modulación de la señal CDMA	41
18	Operación de multiplexación en el enlace "forward"	42
19	Esquema del canal de sincronía	45
20	Función Walsh dentro del intervalo (0,T)	60
21	Modelo geométrico del cubo	70
22	Arquitectura de una estación base	77

GLOSARIO

- AMPS:** Son las siglas en inglés de un sistema avanzado de telefonía móvil.
- Handoff:** Término que se utiliza para describir el cambio de una celda de control actual a una nueva celda de control, durante el proceso de una llamada.
- AMA:** Nombre que se le designa a la cinta en una central de conmutación que almacena la información referente a las llamadas.
- Bps:** Velocidad de transmisión en bits por segundo.
- DQPSK:** Forma de modulación de una señal por variación de fase.
- FDD:** Término que indica división de frecuencia en dos vías.
- Forward:** Término que se utiliza para describir el enlace de comunicación de la celda hacia el móvil.
- Full – Duplex:** Término que se utiliza para nombrar una comunicación en dos sentidos.

GPS:	Sistema electrónico que se utiliza para tomar una frecuencia de referencia, el cual trabaja con un sistema de satélites.
IS-54:	Estándar de telefonía celular, que está basado en el acceso múltiple por división de tiempo.
LFSR:	Filtro de registro inversor realimentado.
MSC:	Central de conmutación móvil.
MTSO:	Oficina de conmutación de telefonía móvil.
Multipath:	Término que se utiliza para describir una señal de trayectoria múltiple.
OMC:	Central de administración de operaciones.
PBX:	Central de ramal privado.
PROM:	Tipo de memoria que se utiliza para almacenar datos.
PSTN:	Central de conmutación de teléfonos de tierra.
SNR:	Relación de señal a ruido.
Spread – Spectrum:	Forma de modular la señal, en donde se esparce la información dentro de un ancho de banda determinado.

TIA: Son las siglas en inglés de la asociación de la industria de telecomunicaciones.

Ttimeslot: Término que se utiliza para denotar una ranura de tiempo en un sistema de acceso múltiple por división de tiempo.

INTRODUCCIÓN

Con el paso del tiempo, se han implementado sistemas de comunicación inalámbrica, que vienen a satisfacer demandas cada vez más exigentes. Debido a la necesidad de satisfacer dichas exigencias, como también por el crecimiento acelerado en el número de usuarios de telefonía inalámbrica, ha sido necesario obtener sistemas cada vez más sofisticados. Esto hace que las empresas que ofrecen dicho servicio, tengan la necesidad de implementar sistemas cada vez más novedosos, los cuales tienen que estar en la capacidad de soportar grandes cantidades de usuarios, sin perder la calidad del servicio.

Para poder satisfacer dichas exigencias por parte de las empresas que prestan el servicio de telefonía inalámbrica, es necesario que se efectúen estudios de factibilidad de implementación de tecnologías más recientes sobre la base de una estructura ya establecida.

Con el fin de implementar una tecnología que satisfaga dichas necesidades, es importante determinar cuál de las tecnologías existentes en el mercado es la que mejor se adecue a nuestras necesidades. Para esto, es necesario tomar en cuenta la capacidad de manejo en la cantidad de usuarios, como también la calidad de la llamada, que se puede tener en una tecnología determinada; también es importante tomar en cuenta los recursos necesarios para su incorporación.

El paso de una tecnología analógica a una digital es urgente, por la necesidad del mejoramiento en el funcionamiento del sistema. Una de las tecnologías que actualmente se está implementando a nivel mundial y que promete poder emigrar a tecnologías de mucha mayor capacidad, es la de CDMA (que es acceso múltiple por división de código), la cual va a mejorar la calidad de las llamadas, mejor utilización

del espectro disponible, y una mejor utilización de los recursos existentes, entre otras mejoras.

1. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA CDMA

1.1 ¿Qué es CDMA?

La segunda generación de sistemas de telefonía celular es la digital, la cual viene luego de una generación de telefonía celular analógica. En Guatemala, se cuenta actualmente con una tecnología analógica como la AMPS (“Advanced Mobile Phone System”), la cual opera en “full-duplex” (o sea que trabaja con dos vías de comunicación), que utiliza una división de frecuencia en dos vías (FDD “frequency-division duplexing”) con un ancho de banda de 25 MHz en cada dirección, sobre las siguientes frecuencias:

- a) Del móvil a la estación base: 824-849 MHz
- b) De la estación base al móvil: 869-894 MHz

En Guatemala, se cuenta con dos bandas para esta tecnología con un ancho de banda de 25 MHz cada una; éstas son las bandas “A” y “B” con 12.5 MHz del espectro para cada dirección.

En el sistema AMPS, cada canal utiliza un ancho de banda de 30 kHz en división de frecuencia (FDMA, que quiere decir Acceso Múltiple por División de Frecuencia), ésta utiliza una forma de modulación analógica (FM o de frecuencia modulada). La frecuencia empleada en una estación base es utilizada en otras estaciones base, como una técnica de reutilización de frecuencias, con el fin de utilizar mejor el ancho de banda con que se dispone.

En 1989, el comité de industrias de telecomunicaciones (TIA con sus siglas en ingles) creó el estándar para la segunda generación de telefonía celular digital, la cual fue publicada en 1992, con el nombre de IS-54. En este estándar, el comité adoptó una tecnología de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA). En este estándar IS-54 de sistema celular, se emplea voz digitalizada a 10 kbps (8 kbps mas los encabezados) el que es modulado en DQPSK de $\pi/4$. Este sistema de TDMA de IS-54 permite 30 kHz/10 kbps = 3 llamadas por canal de 30 kHz de ancho de banda, lo que viene a incrementar la capacidad del sistema AMPS en un factor de 3.

Inmediatamente después de la tecnología IS-54, emerge un estándar de telefonía celular digital; éste es propuesto por Qualcomm, Inc. En 1990, se propone un sistema de telefonía celular digital basada en la tecnología CDMA, la cual es una tecnología de acceso múltiple por división de códigos. Dicha tecnología fue adoptada en Julio de 1993 como una segunda tecnología digital, que fue llamada IS-95. Esta tecnología utiliza una técnica de señal "Spread-Spectrum", que le da una gran capacidad al sistema.

CDMA es una tecnología que, a diferencia de otras como TDMA, AMPS (entre otras), permite que cada estación transmita en el espectro completo de frecuencia todo el tiempo. Esto se logra codificando la conversación de cada uno de los usuarios.

Haciendo una analogía para la descripción básica de este sistema, se puede considerar una teoría de una fiesta en la que hay un grupo de personas queriendo hablar; si esto fuera en FDMA, se harían grupos para poder hablar, mientras que en TDMA la gente esta en el centro del cuarto pero se turnan para hablar, mientras que en CDMA todos hablan a la vez pero en idiomas distintos, descartando las lenguas extrañas como ruido. Por lo tanto, la clave de CDMA es ser capaz de extraer la señal deseada mientras se rechaza todo lo demás como ruido aleatorio.

El sistema utiliza "modulación de sustitución directa", que produce una expansión de su espectro (por eso se le conoce como un sistema de banda ancha). Esto consiste en sustituir cada uno o cero resultante de la digitalización de la voz por una secuencia digital.

El sistema CDMA usa códigos digitales correlacionados para distinguir un usuario de otro. En este sistema, el canal correspondiente a un usuario consiste de una frecuencia específica (que es la frecuencia central de un trozo de espectro de 1.25 MHz en la que se encuentran todos los usuarios registrados a esa celda), un ancho de banda de 1.25 MHz combinado con un código único.

Una de las ventajas de CDMA que conlleva a un aumento en la capacidad es su eficiencia en el re uso de la frecuencia. En los sistemas tradicionales utilizados en Guatemala, celdas que usen los mismos canales deben estar físicamente separadas para evitar la interferencia; esto hace necesario la implementación de complejos planes de re uso de frecuencia para maximizar la capacidad del sistema. En CDMA, las mismas frecuencias son usadas en todas las celdas. Si se usaran celdas sectorizadas, todas las frecuencias pueden emplearse en todos los sectores de la celda. Celdas adyacentes usando la misma frecuencia en CDMA simplemente causan un incremento en el ruido de fondo.

Luego de la codificación de voz, resulta una señal digital de banda angosta de 9600 bps. Esta señal se transforma en una señal de banda ancha de 1.23 MHz al añadir detección de errores y sustituir cada 1 y/o 0 por un código digital (Código Walsh).

En vista de que en el proceso de modulación se insertan secuencias directas de códigos digitales, que luego es preciso codificar en la post demodulación, es necesario que todos los móviles y las radio bases se encuentren sincronizados, es decir, que el

mismo reloj. Estos códigos son los que permiten diferenciar señales individuales pertenecientes a canales distintos.

Uno de los más grandes logros del sistema CDMA es el control de potencia. Como el factor limitante de la capacidad de CDMA es la interferencia, el control de la potencia de cada móvil es crítica para alcanzar máxima capacidad. El resultado del control de la potencia es que la señal de cada móvil llega a la estación base aproximadamente al mismo nivel.

1.2 Técnicas de acceso múltiple:

A continuación, se ampliarán los conceptos que se tienen sobre las técnicas de acceso múltiple, y se hará también una pequeña comparación entre cada una de las técnicas, sin pretender ahondar en cada una de ellas.

Como anteriormente se habló, la primera generación de sistema celular fue la de AMPS y la segunda generación es la de IS-54 e IS-95; éstos son ejemplos de las siguientes técnicas de acceso múltiple:

- FDMA
- TDMA
- CDMA

Estas tres técnicas se pueden combinar para formar técnicas híbridas de acceso múltiple como combinar una de frecuencia con tiempo, o de frecuencia con división de códigos.

En una técnica de FDMA, la frecuencia es dividida en porciones discretas (se divide en M porciones), que forman canales como se muestra en la figura 1. En un sistema TDMA, la frecuencia es dividida en porciones discretas (se divide en M porciones), las cuales durante un periodo determinado de tiempo transmite un usuario con la totalidad de la potencia y la capacidad del canal. En un sistema TDMA, la frecuencia de un canal determinado es dividido en M "timeslots" o ranuras de tiempo, para asignarlo a un usuario determinado, como se muestra en la figura 2. En un sistema CDMA, la energía es distribuida completamente por todo el ancho de banda disponible. En éste sistema, el usuario en lugar de utilizar una porción de tiempo de una frecuencia determinada o de utilizar una frecuencia determinada, utiliza un canal de banda ancha codificado, como se ilustra en la figura 3.

Figura 1. Acceso múltiple por división de frecuencia

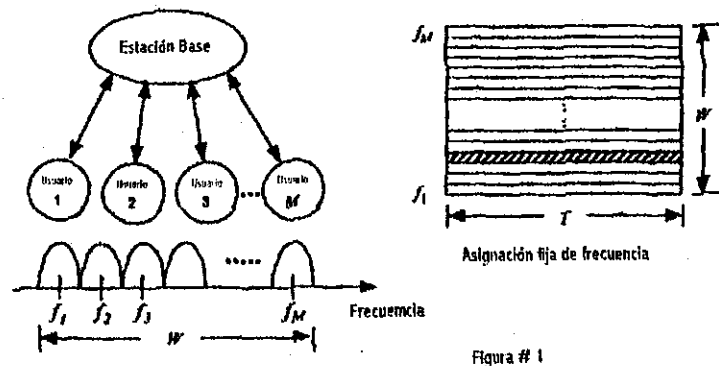


Figura # 1

Fuente: Jhong Sam Lee. CDMA Systems Engineering Handbook. Página: 4.

Figura 2. Acceso múltiple por división de tiempo

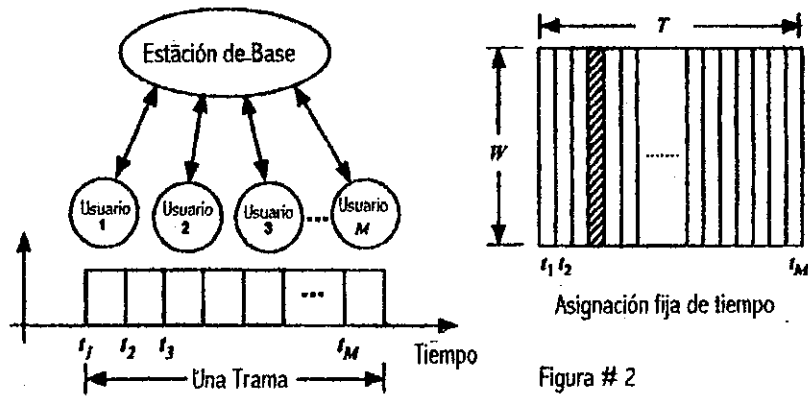


Figura # 2

Fuente: Jhong Sam Lee. CDMA Systems Engineering Handbook. Página: 4.

Figura 3. Acceso múltiple por división de códigos

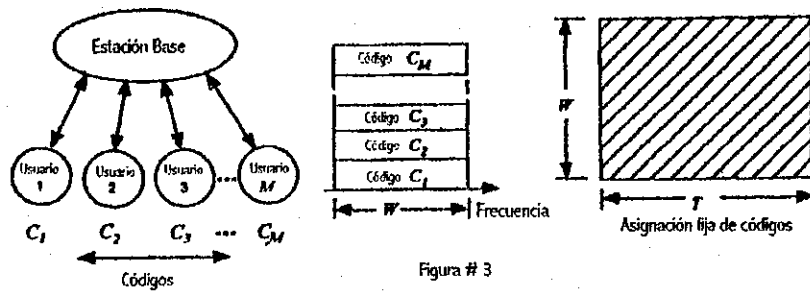


Figura # 3

Fuente: Jhong Sam Lee. CDMA Systems Engineering Handbook. Página: 5.

Luego de que ya se han definido las diferentes técnicas de acceso múltiple, es importante definir las diferencias entre cada uno de ellas. Para ello, es importante que se utilice una situación hipotética, como la que a continuación se presenta:

Suponiendo que cada una de las técnicas de acceso múltiple tiene un ancho de banda de W MHz y cada usuario utiliza una codificación con una razón de $R_b=1/T_b$,

donde T_b es la duración de un bit. Y suponiendo también que cada una de las técnicas de acceso múltiple utiliza señales ortogonales, entonces se puede decir que la capacidad máxima en usuarios es:

$$M = \text{capacidad} \leq \frac{W}{R_b} = WT_b$$

Luego al suponer que la potencia de recepción en cada usuario de cada una de las técnicas de acceso múltiple es S_r , entonces la potencia total recibida P_r es:

$$P_r = MS_r$$

La relación señal a ruido requerida (SNR) ó E_b/N_o (relación de energía de cada bit a ruido), donde se supone que es igual a la actual, es:

$$\frac{E_b}{N_o} \text{ req} = \frac{E_b}{N_o} \text{ actual} = \frac{S_r / R_b}{N_o} = \frac{P_r / M}{N_o R_b}$$

De lo cual obtenemos lo siguiente:

$$M = \frac{(P_r / N_o)}{R_b * (E_b / N_o) \text{ req}}$$

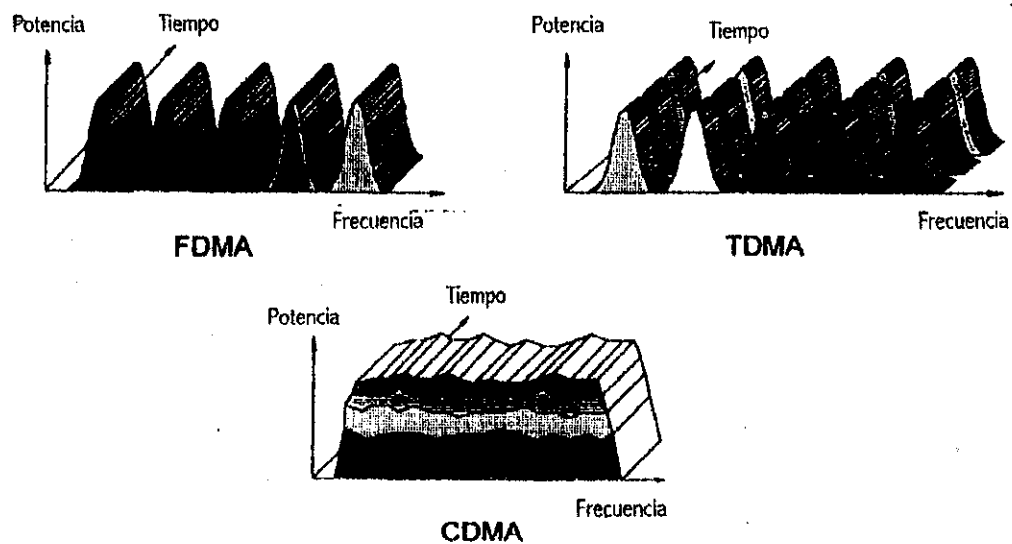
Por lo tanto, en una situación ideal, cada una de las técnicas de acceso múltiple puede entregar una capacidad:

$$M_{\text{FDMA}} = M_{\text{TDMA}} = M_{\text{CDMA}} = \frac{(P_r / N_o)}{R_b * (E_b / N_o) \text{ req}}$$

En realidad, las distintas técnicas de acceso múltiple no pueden desarrollar las mismas capacidades, en donde se puede brevemente discutir algunas de las diferencias entre cada una de las técnicas de acceso múltiple.

Como anteriormente se había mencionado, FDMA basada en AMPS, no puede tolerar dos celdas con la misma frecuencia, a menos que se coloquen ambas a una distancia prudente para lograr una relación de señal a interferencia mayor de 18 dB. Este es uno de los factores limitantes más importantes en la primera generación de sistemas celulares. En el sistema IS-54, se mejora la capacidad del sistema AMPS en un factor de 3. Para poder hacer una mejor comparación entre cada uno de las técnicas de acceso múltiple, es importante que se vea el comportamiento de cada uno en cuanto a los recursos de frecuencia y tiempo, como se muestra en las siguientes figuras.

Figura 4. Utilización de frecuencia en cada técnica de acceso múltiple



Fuente: Jhong Sam Lee. CDMA Systems Engineering Handbook. Página: 6.

Entonces la cuestión es, ¿si supera el sistema CDMA al sistema AMPS con un factor de al menos 10 veces? A primera vista, podría decirse que sí se supera este factor, puesto que el sistema CDMA ofrece un mejor control de potencia en el enlace directo, que es un factor determinante en la capacidad del sistema CDMA, como se comprenderá mas adelante.

La capacidad del sistema de CDMA no se debe únicamente a la muy alta ortogonalidad de sus señales, sino también al mejor manejo de la voz, como también a la utilización de antenas sectorizadas, las cuales incrementan la capacidad del sistema celular en CDMA, como también características importantes, que solo se pueden obtener en el sistema CDMA que no son comunes en los otros dos sistemas FDMA y TDMA.

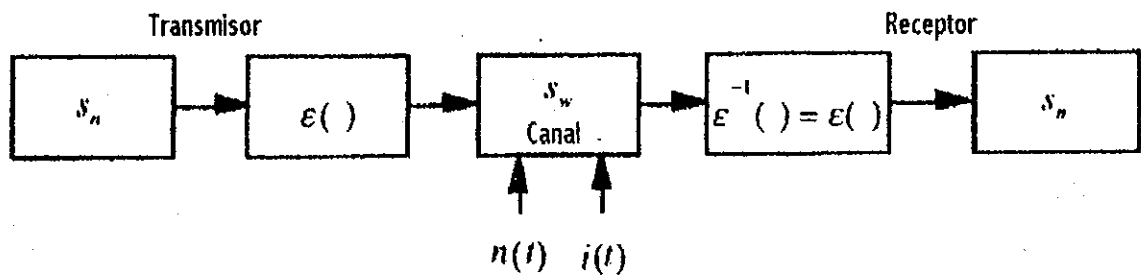
1.3 Sistemas "Spread-Spectrum"

Las técnicas de "Spread-Spectrum" involucran la transmisión de una señal en un ancho de banda determinado, el cual es de mucho mayor tamaño que el original; esto es con el objetivo de obtener ciertas ventajas. Estas técnicas tenían únicamente aplicación militar, las cuales actualmente ya se utilizan para aplicaciones comerciales.

Formalmente en la operación de la señal tanto de transmisión como de recepción, se puede dividir en dos pasos: el primer paso, en el cual nos referimos a la primera modulación, en donde la señal S_n de ancho de banda angosta se forma, y el segundo, en la modulación secundaria, la operación $\epsilon(\)$ es aplicada, y da como resultado una señal de banda ancha (este proceso incluye el esparcido de la señal en un ancho de banda mucho mayor). Esta señal se denotará como S_w .

En la parte de recepción, se aplica el proceso inverso en donde se regresa la señal a su ancho de banda normal, el cual es presentado como un proceso llamado $\epsilon^{-1}(\cdot) = \epsilon(\cdot)$. De otra forma, se puede decir que en el proceso inverso la señal que teníamos como S_w es devuelta a su estado normal S_n , el cual utiliza formas normales de demodulación. En la figura de abajo se presenta el proceso completo para que se pueda entender gráficamente. Es muy importante que se comprenda el por qué de la aplicación de éste sistema, por lo que a continuación presento algunas de éstas razones.

Figura 5. Aplicación de "Spread-Spectrum" a una señal



Fuente: Savo Glisic. Spread Spectrum CDMA system for wireless communications. Página: 2.

1.4 Capacidad contra - sabotajes

Hace ya más o menos medio siglo, desde que se introdujo ésta tecnología para resolver, el problema de las comunicaciones confiables, en la presencia de intensos sabotajes. Si nosotros asumimos que la señal S_w , es recibida con la presencia de una señal de interferencia $i_n(t)$ que podría ser de sabotaje, entonces en el proceso contrario al esparcido de la señal, se tiene:

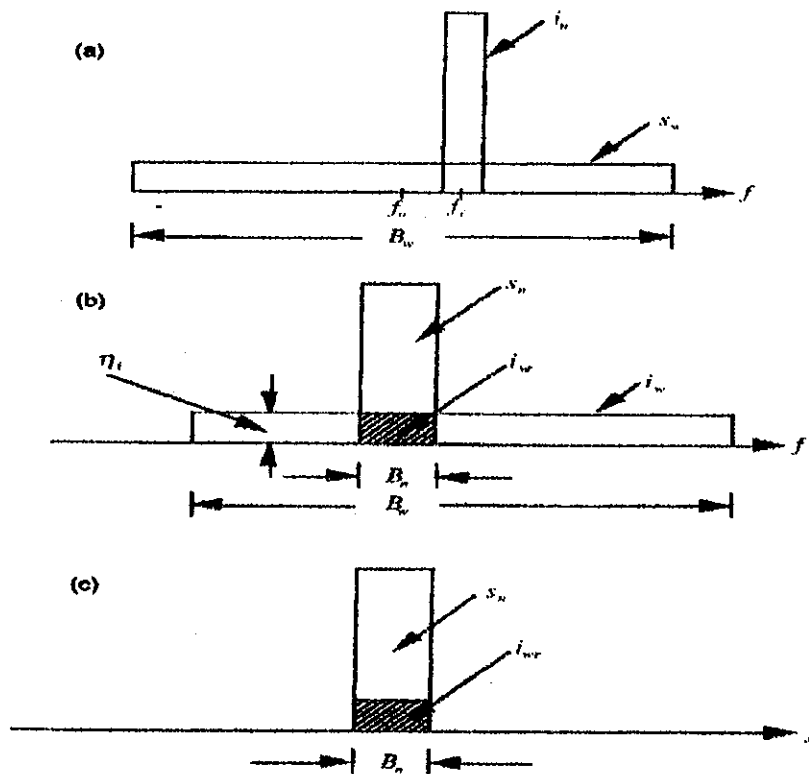
$$\epsilon^{-1}(S_w + i_n) = \epsilon^{-1}(\epsilon(S_n)) + \epsilon^{-1}(i_n) = S_n + \epsilon(i_n) = S_n + i_w$$

En otras palabras, en el proceso inverso al esparcimiento de la señal, se convierte la señal entrante en la suma de una señal de banda angosta útil y una señal de banda ancha de interferencia. Luego de que se filtra la señal de banda angosta (operación $F(\)$) con un filtro pasa-banda con un ancho de banda B_n , igual al ancho de s_n , entonces nosotros tenemos:

$$F(s_n + i_w) \cong s_n + F(i_w) = s_n + i_{wr}$$

Sólo una porción pequeña de la señal de interferencia pasará por el filtro pasa-banda y permanecerá como interferencia residual i_{wr} , porque el ancho de banda B_w de i_w es mucho más grande que B_n . En la siguiente figura, se muestra esquemáticamente el proceso:

Figura 6. Proceso de la señal en "Spread-Spectrum"



Fuente: Savo Glisic. Spread Spectrum CDMA system for wireless communications. Página: 3.

Ahora en la figura 6, se puede relacionar la potencia de la interferencia residual $P(i_{wr}) = \eta_i B_n$ con la potencia total de interferencia, $P(i_w) = \eta_i B_w$ como:

$$P(i_{wr}) = \frac{B_n}{B_w} P(i_w) = \frac{1}{G} P(i_w)$$

En donde el parámetro

$$G = \frac{B_w}{B_n},$$

que muestra que tanto es suprimida esta señal de interferencia. A esto se le llama ganancia de proceso.

Si el nivel de la señal de interferencia es demasiado alto, se puede suprimir dicha señal, previo a la aplicación de la operación $\varepsilon^{-1}()$. Para este efecto, son utilizados varios algoritmos de recuperación de datos, los cuales trabajan de distinta manera, pero que al final tienen el mismo resultado.

1.5 Operación en un ambiente "Multipath"

El término "Multipath" es utilizado para describir el fenómeno en el que se producen varias trayectorias en la señal que se está propagando.

Como un resultado de estas múltiples trayectorias, se tiene que una señal transmitida será recibida como varias replicas de la señal con un retraso en cada una de ellas. La mayoría de las veces se tendrá que estas múltiples trayectorias producirán interferencia unas con otras, que producirá una degradación en el servicio.

Ahora cabe preguntarse: ¿existe alguna forma en la que se puedan separar todas éstas componentes y luego combinarlas para después sincronizarlas dentro de un mismo vector, el cual nos dará buenas condiciones para la demodulación de la señal? Bajo el concepto de "Spread-Spectrum" se le puede llamar a la respuesta "Rake-receiver". Respecto a este término, se puede decir que para una señal recibida:

$$r(t) = \sum_{l=0}^{NB-1} B_l s_w(\tau_l) = \sum_{l=0}^{NB-1} B_l \epsilon_{\tau_l}(s_n(\tau_l)),$$

en donde $\tau_0 = 0$ y τ_l es el retraso relativo experimentado por la señal propagada en la l -ésima trayectoria con respecto a la señal propagada en la trayectoria más corta, y B_l es el coeficiente de intensidad de la correspondiente trayectoria. En el receptor, en la operación contraria al esparcimiento $\epsilon_{\tau_s}^{-1}(\cdot) = \epsilon_{\tau_s}$ sincronizado a la señal con el retardo τ_s , producirá:

$$\epsilon_{\tau_s}(r) = \sum_{l=0}^{L-1} \epsilon_{\tau_s}[B_l \epsilon_{\tau_l}(s_n(\tau_l))],$$

las componentes de la señal dependerán únicamente $\tau_s - \tau_l$, lo cual puede dar como resultado:

$$\epsilon_{\tau_s}(r) = \sum_{l=0}^{L-1} B_l \epsilon_{s-l}[s_n(\tau_l)]$$

Esto dará:

$$\epsilon_{s-l}[s_n(\tau_l)] \Rightarrow \text{pendiente}$$

En donde τ_r , es el rango de operación. En otras palabras, si nosotros logramos sincronía con la m -ésima trayectoria ($\tau_s - \tau_m \cong 0$) dentro de la operación contraria al esparcimiento y $\tau_s - \tau_l > \tau_r$ luego de la operación contraria al esparcimiento de la señal y luego pasada por un filtro pasa-banda, se tendrá:

$$F\{\varepsilon_r(\tau)\} = \beta_m S_m(\tau_m) + R_m$$

Donde $s_{wr}(\tau_l)$ son componente residuales de la señal contenidas en R_m . Ahora si se aumenta el número de operadores $\varepsilon_{\tau_l}^{-1}(\)$ ($i = 0, \dots, L - 1$), en donde todas las componentes de la señal son separadas y luego combinadas dentro de una misma señal

$$\Sigma = \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq m}}^{L-1} [w_m \beta_m S_m(\tau_m) + w_m R_m]$$

Donde w_m es el coeficiente de combinación. Si $B_{\beta_{S_{wr}}(\tau)}$ son independientes, y si la potencia de la señal es P_s , entonces el residual R_m tendrá la siguiente potencia:

$$P_{rm} = \frac{P_s}{G} \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq m}}^{L-1} |B_l|^2$$

Aquí se puede ver que para una máxima relación de señal a ruido a la salida del combinador, $w_m \cong B_m^*$. Para poder tener una primera perspectiva del funcionamiento del sistema, se supondrá una ganancia del combinador $w_m = 1$ y la propagación "multipath" con $B_l = B$, entonces se tiene

$$P_{rm} = P_s(L - 1) |\beta|^2 / G$$

Por lo tanto, la relación de señal a ruido en un ambiente “multipath” a la salida del combinador, se puede aproximar a:

$$\text{SNR}_L = L^2 G / [L(L - 1)] \cong G \quad L \gg 1$$

Y si sólo una señal es demodulada, se tendrá:

$$\text{SNR}_1 = G / (L - 1)$$

Por supuesto, que esto sólo es una aproximación, puesto que un gran número de señales “Spread – Spectrum” existirán en la misma banda de frecuencias.

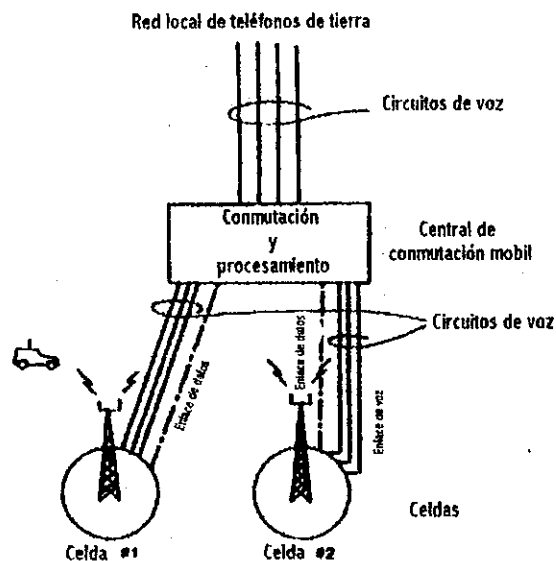
2. CONCEPTOS BÁSICOS DEL SISTEMA CELULAR

2.1 Introducción al sistema celular

Una de las razones más importantes del surgimiento del sistema celular fueron las limitaciones que se tenía en la telefonía móvil convencional, tales como: limitación en la capacidad del servicio, servicio deficiente, una utilización ineficiente del espectro disponible.

Un sistema celular básico cuenta de tres partes: una unidad móvil, una celda y una central de conmutación móvil (MTSO que en inglés quiere decir Mobile Telephone Switch Office), en donde se tienen enlaces de conexión entre cada una de ellas, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 7. Esquema simplificado del sistema celular



Fuente: www.mot.com

1. **Unidad móvil:** dicha unidad móvil consta de una unidad de control, como también cuenta con un transreceptor y un sistema de antena.

2. **Una celda:** la celda funciona como interface entre la central de conmutación (MTSO) y la unidad móvil. Dicha celda cuenta con unidades de control, gabinetes de radio, antenas, una fuente de energía, así como con terminales de información.

3. **Central de conmutación móvil (MTSO):** la oficina de conmutación móvil coordina las celdas, y también conmuta todas las llamadas que se estén generando. Dicha central también controla la comunicación que se tiene con la central de teléfonos de tierra, así como la tarificación. Esta central de conmutación puede ser, tanto digital como analógica. Esta se encarga de crear la conexión entre, ya sea dos unidades móviles, o bien una unidad móvil y un teléfono de tierra. Esta central utiliza troncales de voz, que son similares a las utilizadas por las centrales telefónicas de tierra. Esta central también maneja todos los datos de control entre la central y las celdas que se encuentren a su cargo.

4. **Conexiones:** los enlaces de alta velocidad conectan los tres elementos más importantes del sistema celular. Cada unidad móvil puede utilizar únicamente un canal a la vez; sin embargo el canal utilizado por la unidad móvil puede ser cualquiera que esté disponible dentro de toda la banda celular.

2.2 Estructura del sistema celular analógico

El sistema que actualmente se utiliza en Guatemala es el AMPS que emplea 832 (esto incluyendo los canales de las bandas extendidas) canales dúplex; cada uno está compuesto por un par de canales simplex. Hay 832 canales de transmisión simplex desde 824 hasta 849 MHz, y 832 canales de recepción simplex desde 869 hasta 894 MHz. Cada uno de estos canales simplex es de 30 kHz de ancho de banda; por tanto, AMPS usa FDMA para separar los canales.

En la banda de 800 MHz, las ondas de radio son de cerca de 40 cm de largo y viajan en línea recta; son absorbidas por árboles y plantas y rebotan en el suelo y los edificios. Es posible que una señal enviada por un teléfono móvil llegue a la estación base por una trayectoria directa, pero también con un pequeño retardo después de rebotar en el suelo o en un edificio. Esto puede producir un efecto de eco o de distorsión de la señal. A veces, es posible incluso oír una conversación distante que ha rebotado varias veces.

En Guatemala, de los 832, canales la mitad se asignan a una compañía que aún no se ha definido sobre quien es la banda A, y la otra mitad está asignada a la compañía de comunicaciones celulares, S,A, que es la que tiene asignada la banda B; dicha compañía no cuenta aún con la banda B extendida.

Los 832 canales se dividen en cuatro categorías:

1. Control (base móvil) para administrar el sistema
2. Localización (base móvil) para avisar a usuarios móviles que tienen llamadas.
3. Acceso (bidireccional) para establecimiento de llamadas y asignación de canales
4. Datos (bidireccional) para voz, fax o datos.

Veintiuno de entre todos los canales se reservan para control, y están fijos dentro de un PROM en cada teléfono. Puesto que la misma frecuencia no puede reutilizarse en celdas cercanas, la cantidad real de canales de voz disponible por celda es mucho menor que 832, normalmente cerca de 45.

Cada teléfono móvil en AMPS tiene un número de serie de 32 bits y un número telefónico de 10 dígitos en su PROM. El número de teléfono se representa como un código de área de 3 dígitos, en 10 bits, y un número de suscriptor de 7 dígitos, en 24 bits. Cuando un teléfono se enciende, examina una lista preprogramada de 21 canales de control para encontrar la señal más potente. Los teléfonos móviles se programan para rastrear únicamente el lado A, únicamente el lado B, el lado A de preferencia o el lado B de preferencia, que depende de a cuál(es) servicio(s) se ha suscrito el cliente. Por el canal de control, se aprenden los número de los canales de acceso y de aviso.

El teléfono difunde entonces su número de serie de 32 bits y su número de teléfono de 34 bits. Al igual que toda la información de control de AMPS, este paquete se envía en forma digital varias veces y con código de corrección de error, aunque los canales de voz mismos son analógicos.

Cuando la estación base oye el anuncio, avisa al MTSO, la cual registra la existencia de su nuevo cliente, y también informa a la MTSO local del cliente de su ubicación actual. Durante el funcionamiento normal, el teléfono móvil se vuelve a registrar cada 15 minutos aproximadamente.

Para hacer una llamada, un usuario enciende el teléfono, teclea el número al que desea llamar y oprime el botón de ENVIAR (SEND). El teléfono envía entonces el número por llamar y su propia identidad por el canal de acceso. Si ocurre una colisión, lo intenta otra vez más tarde. Cuando la estación base recibe la petición, informa a la MTSO. Si el que llama es un cliente de la compañía de la MTSO (o de uno de sus socios); la MTSO busca un canal desocupado para la llamada; si encuentra uno, el número de canal se envía de regreso por el canal de control. A continuación, el teléfono móvil se conecta en forma automática con el canal de voz seleccionado, y espera hasta que la persona llamada levante el teléfono.

Las llamadas que llegan funcionan de forma diferente. Para empezar, todos los teléfonos desocupados escuchan continuamente el canal de aviso para detectar mensajes dirigidos a ellos. Cuando se hace una llamada a un teléfono móvil (ya sea desde un teléfono fijo o algún otro teléfono móvil), se envía un paquete a la MTSO local del destinatario de la llamada para averiguar dónde se encuentra. Luego se envía un paquete a la estación base de su celda actual, la cual realiza entonces una difusión por el canal de aviso de la forma: "Unidad 14, ¿está ahí?" El teléfono llamado responde entonces "Si" por el canal de control. La base entonces dice algo como: "Unidad 14, tiene llamada por el canal 3". En este punto, el teléfono llamado conmuta al canal 3 y empieza a timbrar.

Existe un concepto importante durante una llamada y es el "Handoff". Durante el proceso de una llamada luego de que fue establecida, el móvil se encuentra dentro del área de cobertura de cierta celda, pero si el móvil se empieza a mover fuera del área de cobertura de la celda, entonces la señal empieza a decaer. La celda que actualmente le está dando servicio al móvil envía una petición de "Handoff" a la central. Entonces la central reconoce las señales que se están recibiendo de las celdas más cercanas al móvil, determina cuál de todas es la que tiene más potencia, y entonces le asigna un nuevo canal al móvil con la nueva celda, esto sin que la llamada se interrumpa.

2.3 Elementos del sistema celular

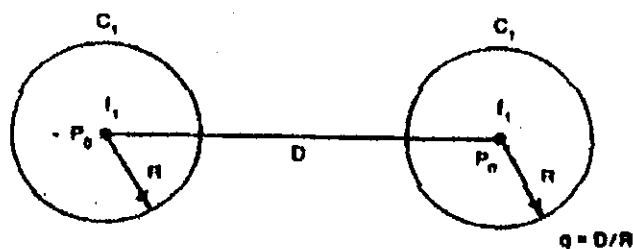
Basados en el concepto de la eficiente utilización del espectro disponible, el sistema celular se puede dividir en varios conceptos importantes tales como: (1) reutilización de las frecuencias (2) reducción de la interferencia co-canal (esto se refiere a la interferencia que pueda existir entre dos canales con la misma frecuencia en celdas distintas) (3) la relación de portadora a interferencia que deseemos tener (4) mecanismos de "handoff", y (5) división de celdas.

2.4 Reutilización de frecuencias

Los canales de voz que se utilizan en el sistema celular constan de dos frecuencias, una para cada dirección, por lo que se les llama transmisión "full-duplex". Un canal en particular F_1 puede estar siendo utilizado por una celda C_1 con un radio de cobertura R , mientras que en otra celda con el mismo radio de cobertura a una distancia D de la primera, se puede estar utilizando el mismo canal.

La reutilización de frecuencias es uno de los conceptos más importantes dentro del sistema celular. Con este concepto, de reutilización de frecuencias se podría pensar que dos personas podrían estar accedendo al mismo canal en distintas celdas. Esto nos hace pensar que al reutilizar frecuencias se está incrementando la capacidad de nuestro sistema, mientras que también si nosotros no se tiene un buen diseño del sistema, se podría caer en el problema de tener interferencias co-canal bien grande.

Figura 8. Utilización de un mismo canal en dos celdas distintas



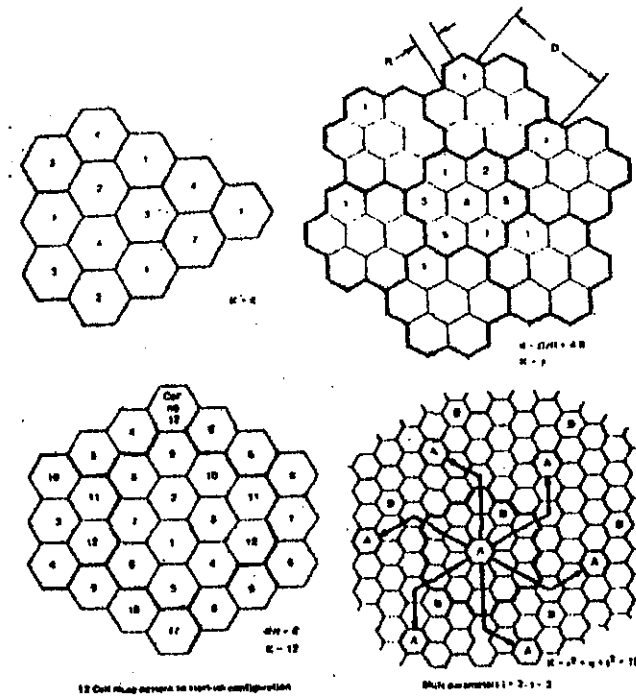
La distancia mínima que debemos guardar cuando necesitamos utilizar el mismo canal en dos celdas dependerá de varios factores, tales como el número de canales del mismo tipo que utilizaremos en otras celdas, como también el tipo del terreno en el que nosotros tenemos nuestras celdas, como también la altura a las que tengamos nuestras antenas como también la potencia de transmisión.

La distancia mínima que nosotros debemos dejar entre celdas con canales iguales se puede determinar por medio de:

$$D = \sqrt{3K} R$$

Donde K es el patrón de re utilización de frecuencias que se muestra en la siguiente figura:

Figura 9. Patrón de re utilización de frecuencias



Fuente: William C. Y. Lee. Mobile Cellular Telecommunications. Página: 58.

$$D = \begin{cases} 3.46R & K = 4 \\ 4.6R & K = 7 \\ 6R & K = 12 \\ 7.55R & K = 19 \end{cases}$$

Si todas las celdas transmiten a la misma potencia, entonces K se incrementa y la distancia D de reutilización de frecuencias también aumenta. El incremento de la distancia D reduce la posibilidad de interferencia co-canal. En teoría, el incremento de K es deseable, sin embargo, el número de canales asignados es fijo. Cuando K es demasiado grande, el número de canales asignados a cada una de las K celdas se vuelve mucho menor. Entonces el reto es obtener un K pequeño, sin perder de vista las necesidades de funcionamiento del sistema.

2.5 Reducción de la interferencia co-canal

La utilización del mismo canal en dos celdas distantes está limitada por la interferencia co-canal que se adquiere en ambas celdas.

Asumiendo que el tamaño de las celdas sea aproximadamente el mismo. El tamaño de la celda está determinado por el área de cobertura, como también por la potencia de la señal en cada celda. La interferencia co-canal está en función del parámetro q, como a continuación se muestra:

$$q = \frac{D}{R}$$

El parámetro q es un factor de reducción de la interferencia co-canal. Cuando el factor q se incrementa, la interferencia co-canal se reduce. Además, el factor D está en función de K y de la relación de portadora a interferencia C/I.

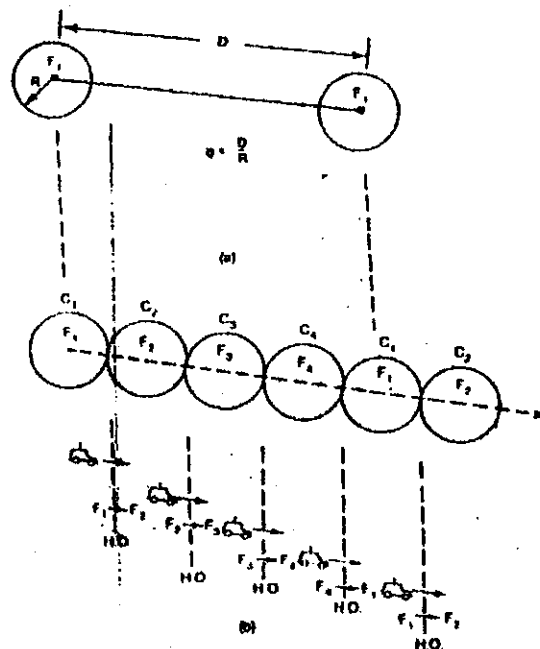
2.6 Relación de portadora a interferencia C/I

Existen dos condiciones que se han de considerar: (1) la interferencia co-canal en la señal recibida por el móvil y (2) la interferencia co-canal en la señal recibida por la celda. Cuando la interferencia co-canal recibida tanto en la celda como en el móvil son iguales, se dice que se tiene un *sistema balanceado*. En sistemas celulares, normalmente se utiliza una relación portadora a interferencia de 18 dB aunque en la práctica se puede llegar hasta 16 dB

2.7 Mecanismos de "Handoff"

Como a anteriormente se había mencionado, el mecanismo de "handoff" es el paso de una celda a otra, sin tener que cortar la comunicación que se ha establecido en la llamada que se está cursando. Para poder describir dicho mecanismo, es necesario observar la figura que a continuación se presenta.

Figura 10. Mecanismo de "Handoff"



Fuente: Savo Glisic. Spread Spectrum CDMA system for wireless communications. Página: 2.

Dos celdas que utilizan la misma frecuencia F_1 separadas por una distancia D se muestran en la figura anterior. El radio R y la distancia D están siendo gobernadas por el factor q . Ahora se seguirá el patrón de co-canales en distintas celdas con las frecuencias F_2 , F_3 y F_4 como se muestran en la figura anterior; esto con el fin de dar cobertura en un área determinada. Dichas frecuencias F_2 , F_3 y F_4 corresponden a las celdas C_2 , C_3 y C_4 , en donde también se toma en cuenta el factor q para cada una de ellas.

Suponiendo que una unidad móvil genera una llamada en la celda C_1 y se mueve a la celda C_2 . Durante este proceso, se podría decir que el usuario tendría que generar otra llamada en la celda C_2 en la frecuencia F_2 , pero en el sistema celular; esto se hace automáticamente.

2.8 División de celdas

Una de las causas más importantes de implementar el sistema celular es la mejor utilización del espectro. La reutilización de frecuencias es uno de los conceptos importantes dentro del sistema celular, otro de los conceptos importantes es la división de celdas. Cuando dentro del área de cobertura de una celda aumenta considerablemente el tráfico a manejar, se puede hacer la división de la celda en celdas más pequeñas. Generalmente el nuevo radio de la celda es la mitad del de la original.

La división de una celda debe de planearse con tiempo. Se debe de tomar en cuenta la potencia de transmisión, el número de canales que se va a emplear, las frecuencias que se emplearan, el sitio en el que se pondrá la celda, así también se debe de considerar el tráfico que se desea manejar.

2.9 Administración de la frecuencia y asignación de canales

La función primordial de la administración de frecuencias es la distribución de canales en grupos, para luego asignarlos en celdas. Cuando se establece una llamada, se le asigna un canal de voz al móvil; tarea que le corresponde a la central; la asignación de este canal debe de ser la adecuada, para no causar interferencia en otras celdas.

Actualmente en Guatemala, se está trabajando con la banda B de celulares, la cual está dividida en 333 canales, de estos 333 canales 21 canales son de control, los cuales están asignados del 334 al 354 y los canales de voz están asignados del canal 355 al 666. Por lo que se tienen 312 canales de voz. Estos canales de voz se pueden agrupar en sub-grupos. Puesto que se cuentan con 21 canales de control, es lógico que se agrupen estos 312 canales de voz entre los 21 canales de control. Cada sub-grupo

consta de 16 canales, en donde cada canal de este sub-grupo tiene que tener un espaciamiento mínimo de 21 canales. Dicho espaciamiento entre canales adyacentes es importante para tener poca interferencia por canal adyacente.

En un sistema con un patrón de reutilización de frecuencias de 7 se tiene en cada una de las celdas tres sub-grupos de canales, $iA + iB + iC$, donde la i representa un entero entre 1 y 7. Por lo que tenemos más de 45 canales por celda. La separación mínima entre tres sub-grupos de canales es de 7 canales. Si se tienen 6 sub-grupos de canales equipados en una celda con antenas omnidireccionales, la separación mínima entre dos canales adyacentes puede ser únicamente 3 ($21/6 > 3$).

Los 21 canales de control que anteriormente se mencionaron también tienen que tener ciertas restricciones a la hora de asignarlos a una celda determinada. Algo que es bien importante de notar es que no es imperante que existan dichos canales de control, para que una llamada se pueda establecer. Esto es si no existieran los canales de control el teléfono tendría que buscar entre los 333 canales para poder tomar uno en especial. El número 21 en los canales de control se deriva de la utilización del patrón de reutilización de 7 con celdas sectoriales de 120° , lo que nos da un total de 21 sectores, por lo que se necesitan 21 canales de control.

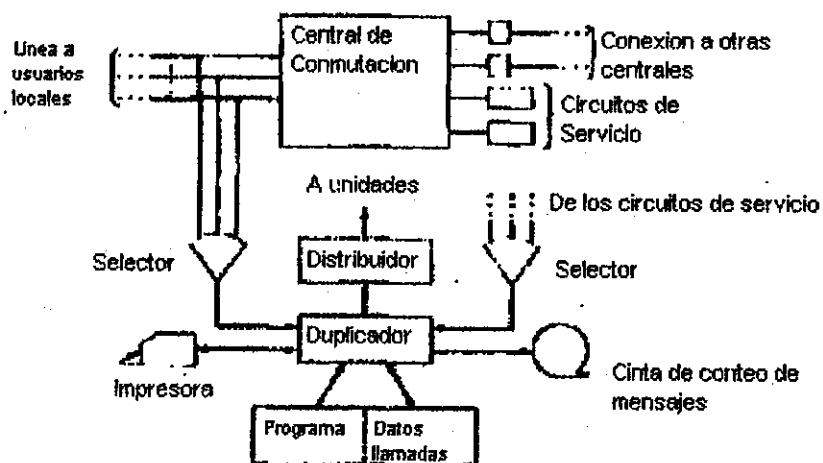
Los canales de control se pueden clasificar en dos: canal de búsqueda y un canal de acceso. El canal de acceso es utilizado por el móvil para generar una llamada, mientras que el canal de búsqueda es utilizado por la celda para establecer una llamada a móvil. Estos canales tienen un ancho de banda de 30 kHz. Por lo general, a estos canales se les llama de distinta manera tal como: "forward" para el canal de búsqueda y "reverse" para el canal de acceso.

2.10 Central de conmutación en el sistema celular analógico

El equipo de conmutación es el cerebro del sistema celular analógico. Dicha central consiste en dos partes, una de conmutación y otra de procesamiento. La parte de conmutación es igual que una de telefonía de tierra. La parte de procesamiento es una computadora de aplicaciones especiales. Dicha parte controla tanto asignación de frecuencias en las celdas, como también controla el proceso de handoff (toma la decisión del momento en el que se debe de dar un handoff), como también monitorea el tráfico que se esta cursando.

Las mayoría de centrales de conmutación analógica cuentan con procesadores, memoria, red de conmutación, troncales y también circuitos para diversas funciones. El control del sistema está centralizado, por lo que es necesario utilizar redundancia en la mayoría de los procesos que aquí se ejecutan. Un sistema de conmutación analógico común se muestra en la siguiente figura:

Figura 11. Esquema de una central de conmutación



Fuente: William Lee. Mobile Cellular Telecommunications. Página: 127

Los programas utilizados por la central se encuentran localizados en la memoria de la central; dichos programas controlan el proceso de las llamadas. Dicha central está encargada de interconectar las llamadas que aquí se produzcan. Dicha central esta encargada de hacer la tarificación de las llamadas a través de las cintas de la AMA (automatic message accounting). Dentro de la central, existen tres programas principales, tales como: (1) proceso de llamadas en donde se controla el establecimiento de la llamada, como también se controlan los "handoffs", como también la desconexión de las llamadas, (2) mantenimiento del equipo, en que se incluye la detección de fallas dentro del propio sistema y (3) administración, en donde se maneja los registros de los usuarios, y registro de las troncales que se utilizan dentro de la central, así como la tarificación.

Como anteriormente se mencionó, la central MTSO está interconectada con otras centrales de conmutación de teléfonos de tierra, en donde dicha conexión se realiza entre troncales. La interconexión de la MTSO es una especie de PBX privado. También cuenta con conexiones hacia las celdas, las cuales se logran a través de troncales, que son conexiones para canales de voz. Cada troncal está físicamente conectada a los canales de voz de la celda, en donde la decisión del número de canales de voz que se desean poner en una celda determinada se hace en función del tráfico que la misma maneje, también el porcentaje de bloqueo que se esté dispuesto a manejar. Dichas conexiones se logran por enlaces de E1 o ya sea de T1.

2.11 Enlace de datos para la MTSO

La implementación de enlaces de datos para el diseño del sistema celular es muy importante, pues el funcionamiento de dichos enlaces determina gran parte del desempeño del sistema.

Las celdas reciben órdenes de la MTSO para el manejo del proceso de las llamadas a través de dichos enlaces. Así también a través de éste enlace se reciben datos del móvil, a través del canal de control. Existen tres tipos de conexiones, tales como: (1) líneas de tierra, (2) radio comunicación de 800 MHz y (3) microondas. A continuación, se hará una breve descripción de cada uno de estos tipos de enlaces, sus ventajas sus ventajas y desventajas:

a. Las comunicaciones por líneas de tierra utilizan enlaces de teléfono que proveen las empresas de telefonía de tierra, o sea a través de enlaces E1 o T1. A través de dichos enlaces, se puede transmitir a velocidades bajas tales como 2.4 kbps; por eso, es necesario alquilar enlaces de alta velocidad. Los enlaces de T1 tienen un ancho de banda amplio (1.5 Mbps), que consiste de 24 canales; cada canal es capaz de transmitir a 64 kbps. Para poder manejar estas señales, existe una terminal convertidora que se encarga de pasar las señales analógicas entrantes a señales digitales; esto es con el fin de aprovechar al máximo las ventajas que se obtienen con la transmisión digital de datos. Varias terminales digitales se multiplexan para poder formar una línea digital simple llamada "Chanel bank".

b. Este "Chanel bank" multiplexa varias señales de voz y las codifica a una forma digital. La velocidad de muestreo es de 8 kHz. Cada canal es codificado en palabras de 7 bits. Un bit de señalización indica el fin de cada muestra de 7 bits. Después de las 24 muestras (que es una muestra de cada canal), se manda otra trama de datos. El número de enlaces de T1 o E1 se hace basándose en el número de canales de voz que se tengan en la celda, y también se tienen que tener en cuenta los canales de control propios de la celda. Una de las desventajas de utilizar estos enlaces arrendados en la empresa de teléfonos de tierra es la dependencia que se tiene con dicha empresa, puesto que hay que estar pendiente de los arreglos que dicha empresa haga, como también hay que tomar en cuenta el costo del arrendamiento de los enlaces.

c. Los datos también se pueden enviar con enlaces de radio de 800 MHz. Sin embargo, dichos enlaces crean mucha interferencia, como también hay que tomar en cuenta que éstos proveen una velocidad a los canales de 10 kbps, que da un pobre desempeño al sistema.

d. Los enlaces de microonda parecen ser la forma más conveniente de transmisión de datos, en que se tiene más control sobre los enlaces, pues éstos son propiedad de la empresa de celulares, y se pueden instalar sin mayor problema en áreas rurales.

2.12 Capacidad máxima del sistema celular AMPS

Básicamente la capacidad del sistema celular basado en la tecnología AMPS está limitada por factores, tales como la interferencia co-canal, topografía del terreno, altura en antenas, potencia de transmisión, entre otros. El principal reto en el sistema celular AMPS es la máxima reutilización de las frecuencias, que se ven limitadas por la interferencia co-canal.

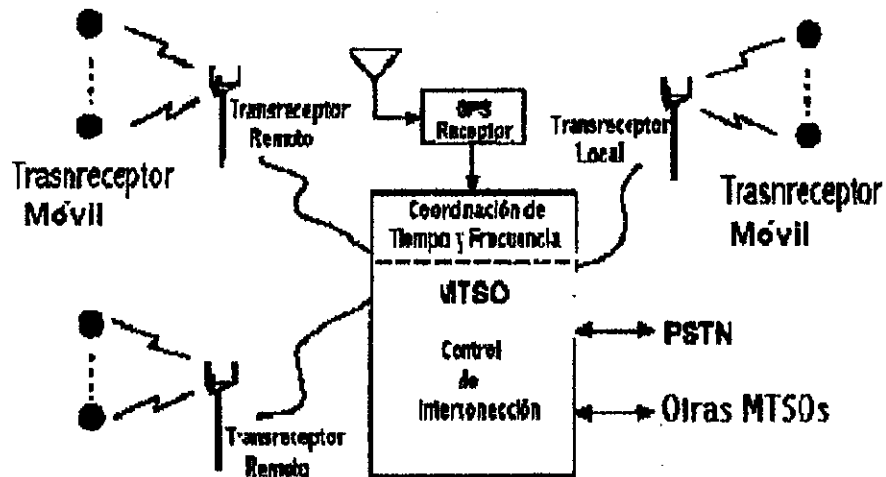
Por esa razón no se puede determinar una capacidad máxima del sistema. En la práctica se hacen varios estudios para incrementar la capacidad del sistema. Se pueden hacer estudios de interferencia en toda el área de cobertura, que muestran patrones de reuso, y también se pueden hacer estudios para la potencia y altura de antenas.

3. ESTÁNDARES IS-95

Dichos estándares se refieren a un sistema de “modo doble”, que es capaz de trabajar en modo analógico, como también en modo digital, y el cambio de la primera a la segunda. Por lo tanto, existen secciones en las que tendremos que referirnos a ambas tecnologías.

Dentro del sistema IS-95, también se maneja la comunicación entre centrales móviles (MTSO) con las centrales de tierra (PSTN), como anteriormente se ha mencionado en el sistema analógico. En la figura que a continuación se muestra, se puede ver, a grandes rasgos, la forma de comunicación del sistema digital basado en IS-95:

Figura 12. Esquema del sistema celular IS-95



Fuente: Jhong Sam Lee. CDMA Systems Engineering Handbook. Página: 336

abajo o enlace “forward”; también se describen los canales de acceso y de tráfico para el enlace hacia arriba o enlace de “reverse”.

Como se podrá observar más adelante, las técnicas de modulación, como también las técnicas de acceso múltiple, son diferentes en el enlace hacia a bajo como en el enlace hacia arriba. Ambos enlaces están sujetos a los requisitos de manejo de frecuencia y tiempo que se establecen en los estándares IS-95. Antes de poder pasar a explicar el funcionamiento de cada uno de estos canales, pasaré a explicar la coordinación de la frecuencia y tiempo en el estándar IS-95, concepto que es muy importante.

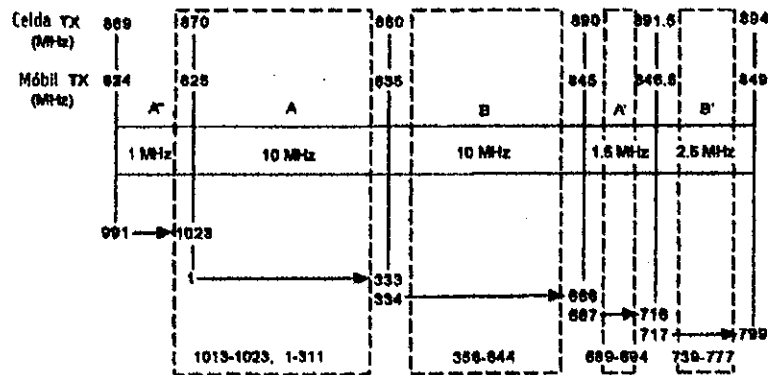
3.1 Coordinación de tiempo y frecuencia

Cierto número de estaciones base se encuentran dentro de una misma ubicación geográfica, como se mostró también en el sistema analógico; dichas estaciones móviles se encuentran conectadas a una central de conmutación celular (MTSO), la cual está conectada a una central de teléfonos de tierra (PTSN), a través de una central de conmutación móvil (con sus siglas en inglés MSC). Dichas centrales de conmutación móvil se encuentran bajo el control de un centro de administración de operaciones (con sus siglas en inglés OMC). Una de las funciones más críticas de la central de conmutación móvil, en el sistema CDMA, es la de mantener los estándares de frecuencia como también tiempo, o sea que aparte de las funciones normales de conmutación que tienen dichas centrales, también se les asigna la coordinación de frecuencia como de tiempo. Dichas asignaciones extras incluyen el manejo de la frecuencia de referencia, como también el manejo de la sincronía, el mantenimiento del reloj del sistema, los cuales se encuentran referenciados a una señal de satélite que comúnmente se le conoce “GPS” (Global Position System).

3.2 Frecuencias y bandas utilizadas en sistemas celulares

En Norte América, se utilizó el sistema AMPS que trabajaba con FDMA, como una de sus primeras forma de sistema celular, el cual divide el espectro en canales de 30 kHz, con una modulación analógica FM en los canales de voz. A continuación se presenta un diagrama de las frecuencias utilizadas en sistema celular:

Figura 14. Espectro de frecuencias celulares



Fuente: Jhong Sam Lee. CDMA Systems Engineering Handbook. Página: 337.

Como se puede observar, se han utilizado dos bandas de frecuencia celular que son la "A" y la "B"; esto con el fin de dar a dos empresas la oportunidad de competir por el servicio en un área determinada.

La correspondencia entre dichos canales y la frecuencia se obtiene de la siguiente manera, en donde el número de canal es N:

Para móvil:

$$0.030 N + 825.000 \text{ MHz}, \quad 1 \leq N \leq 799$$

$$0.030 (N - 1023) + 825.000 \text{ MHz}, \quad 990 \leq N \leq 1023$$

Para base:

$$0.030 N + 870.000 \text{ MHz}$$

$$1 \leq N \leq 799$$

$$0.030(N - 1023) + 870.000 \text{ MHz}$$

$$990 \leq N \leq 1023$$

A diferencia del sistema celular basado en FDMA, el sistema CDMA no necesita hacer agrupaciones de celdas para optimizar la utilización de frecuencias, como tampoco es necesario hacer estudios complicados de distancias entre celdas para evitar interferencia cocanal. En el sistema CDMA, se utiliza la misma frecuencia en todas las celdas, utilizando una técnica de "Spread Spectrum" para evitar interferencias.

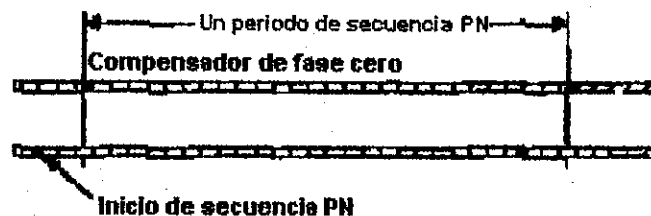
El ancho de banda del sistema CDMA en IS-95 es de 1.25 MHz. Como anteriormente se había mostrado, la distribución de las frecuencias analógicas, sería posible implementar el sistema CDMA sobre la banda extendida A'. En nuestro caso nacional, se cuenta actualmente con la banda "B" para la empresa que presta este servicio de telefonía celular, en donde se podrían utilizar varios canales analógicos, y luego dejar espacio para poder implementar una portadora de CDMA; éste tema se tratará con más detalle en el último capítulo de esta tesis.

3.3 Manejo del tiempo dentro del estándar IS-95

Mientras que el manejo de la coordinación del tiempo en el sistema celular analógico no es un factor de tanta importancia, mientras que para el diseño del sistema celular digital basado en CDMA es muy importante. Cada estación base del sistema IS-95 necesita mantener un reloj, que se encuentra sincronizado con la señal de un GPS. El manejo de este reloj está relacionado con la utilización del código PN, el cual es utilizado por cada una de las estaciones base. Existen dos tipos de códigos PN, un código "corto" que tiene un período de 26.66 ms, y un código "largo" que tiene un período de 41 días.

La importancia de la buena sincronización del tiempo, en cada una de las distintas estaciones bases del sistema CDMA, estriba en el manejo de la misma frecuencia para cada una de la estaciones base, las cuales utilizan los mismos dos códigos PN. El móvil logra diferenciar entre la distintas estaciones base únicamente por la posición de inicio del código PN, que es único para cada una de las estaciones base (“Phase offsets”), como se muestra en la siguiente figura.

Figura 15. Inicio de una secuencia de código PN



Fuente: Jhong Sam Lee. CDMA Systems Engineering Handbook. Página: 339.

Aunque cada una de las estaciones base se encuentra sincronizada respecto al mismo GPS para generar su código PN, existe un retardo en la propagación de la información (aproximadamente de 3.336 ns/m) para cada uno de los móviles, puesto que cada uno de los móviles se encuentra a una distancia distinta. El tiempo de referencia en cada uno de los móviles se establece cuando el móvil adquiere el servicio de una estación base determinada, en donde por lo normal, se encuentra más cerca del móvil, en que el móvil lee el mensaje que viene en el canal de sincronía. El mensaje contiene información que permite al móvil engancharse al código PN “largo”, y sincronizar su tiempo a la estación base a la que se ha enganchado (donde existe un pequeño retraso en la transmisión). Utilizando este retraso que se produce en el funcionamiento del sistema, el móvil transmite en el canal de “reverse”, o hacia arriba con un retraso adicional.

3.4 Descripción del enlace hacia abajo o "forward"

La estructura de los canales del enlace "forward" consiste en la transmisión simultánea de más de 64 canales con distintas funciones, los cuales son ortogonalmente multiplexados, dentro de la misma portadora de RF. Uno de estos canales se transmite a una potencia alta, el cual es el canal piloto, que se encuentra transmitiendo continuamente con una fase de referencia, para la recepción de la portadora modulada con información. Otro de estos canales, que es el de sincronía, se encuentra transmitiendo continuamente, y transmite información del sistema a cada uno de los móviles. Arriba de siete canales, son utilizados como canales de búsqueda o de "paging", donde se lleva información de la asignación de canales, como también otro tipo de información importante para el móvil. El resto de los canales son utilizados como canales de voz, en los que también se maneja información importante para el móvil.

Actualmente a nivel mundial, existen diferentes fabricantes de esta tecnología, los cuales pueden tener distintas formas de manejar el sistema, sin embargo éstos se deben de basar en características comunes para el buen funcionamiento del sistema; a continuación se presentan algunas de las características más importantes que se deben de tener en cuenta en el enlace hacia a bajo o "forward".

- **Multiplexación:** el manejo de los canales del enlace "forward" está basada en la división de códigos ortogonales, con un esquema de multiplexación de portadoras digitales, conocidas como funciones "Walsh".
- **Rechazo de interferencia:** el enlace "forward" se encuentra modulado con un código PN basado en la técnica "Spread-Spectrum direct sequence"; esto es el objetivo de poder recibir la información de la estación base correcta, y así poder eliminar la información de estaciones base que no le corresponden al móvil.

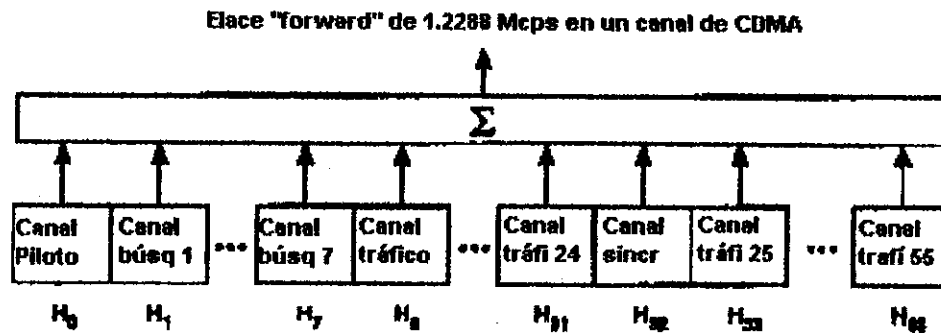
- **Modulación:** la modulación de las portadoras de RF es un tipo de modulación en cuadratura QPSK (quaternary phase-shift keying).
- **Forma de los pulsos:** la forma de los pulsos de la señal de salida, esta determinado por los FIR, que son los filtros de salida, los cuales están diseñados para el control de la potencia de salida; esto es para evitar la interferencia de frecuencias adyacentes.
- **Velocidad del código PN:** la velocidad del código PN que es 1.2288 Mcps, que es 128 veces la máxima velocidad de información de la fuente que es de 9.6 kbps.
- **Ancho de banda efectivo:** para la velocidad del código PN y el control del espectro, se tiene dentro de los estándares del IS-95 para el enlace "forward" un ancho de banda de 1.25 MHz.
- **Codificación de la voz:** varias velocidades de codificadores de voz hay en existencia, con velocidades tales como 1,200, 2,400, 4,800 y 9,600 bps dependiendo de la aplicación de la voz.
- **Control de error en la codificación:** en el enlace "forward", se utiliza una codificación con una razón de $\frac{1}{2}$ convolución, con una codificación Viterbi.
- **Entrelazado:** para evitar ráfagas de error (con distintas posibilidades, tales como desvanecimientos en los canales de comunicación) en el enlace "forward", se entrelazan códigos de recuperación de datos, utilizando tramas de 20 ms.

3.5 Esquema de multiplexación ortogonal

En el enlace "forward", cada canal es distinguido de los demás, por medio de una secuencia ortogonal Walsh modulada como datos codificados. Las secuencias Walsh son filas de una matriz Hadamard, cuyas dimensiones son potencia de 2 y son ortogonales, cuando se correlacionan sobre su período. Los datos en el canal de

búsqueda y en los canales de tráfico son revueltos utilizando una asignación por compensación de fase de un código PN largo, el cual da un cierto grado de privacidad, aunque hay que tomar en cuenta que no se utiliza para distinguir canales. La asignación de canales se muestra en la siguiente figura con su correspondiente secuencia Walsh, H_i , donde $i = 0, 1, \dots, 63$.

Figura 16. Asignación de canales dentro del estándar IS-95



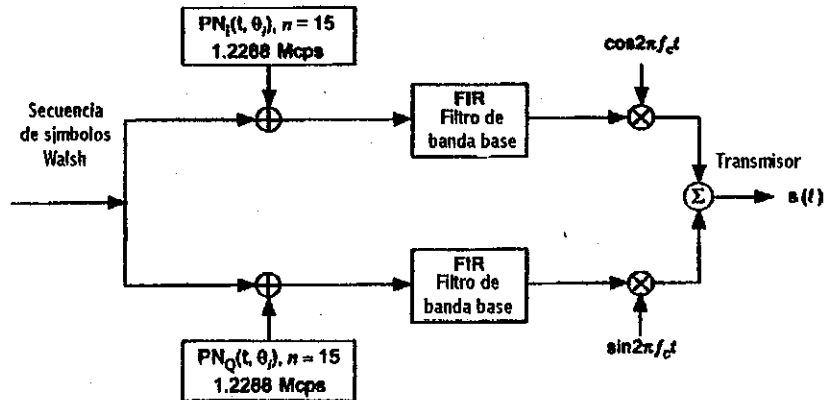
Fuente: Jhong Sam Lee. CDMA Systems Engineering Handbook. Página: 342.

La velocidad de banda base de cada canal que se está multiplexando es distinta, con un máximo de 19.2 kilosimbolos por segundo (ksps). Cada ráfaga de datos de los canales de banda base son combinados con una secuencia Walsh de 64-chip, y se repite a una velocidad de 19.2 kbps. De este modo, la combinación en la multiplexación ortogonal en el enlace "forward" con una velocidad de $64 \times 19.2 \text{ kbps} = 1.2288 \text{ Mcps}$.

Como se muestra en la siguiente figura, los datos multiplexados de un canal en particular son combinados por separado con un código corto PN; éste es identificado como I y Q componentes de portadora en cuadratura. Los canales I y Q del código PN son denotados por $PN_I(t, \theta_i)$ y $PN_Q(t, \theta_i)$, respectivamente, y son generados por 15 etapas ($n=15$) de registros inversores linealmente realimentados (con sus siglas en ingles LFSR). La notación θ_i denota un código PN, con compensación de fase asignado a una

estación base en particular, y es seleccionada de entre 512 valores posibles. La forma de la señal de los canales I y Q, están moduladas en fase ($\cos 2\pi f_c t$) y en cuadratura ($\sin 2\pi f_c t$) luego son combinadas y transmitidas.

Figura 17. Modulación de la señal en CDMA

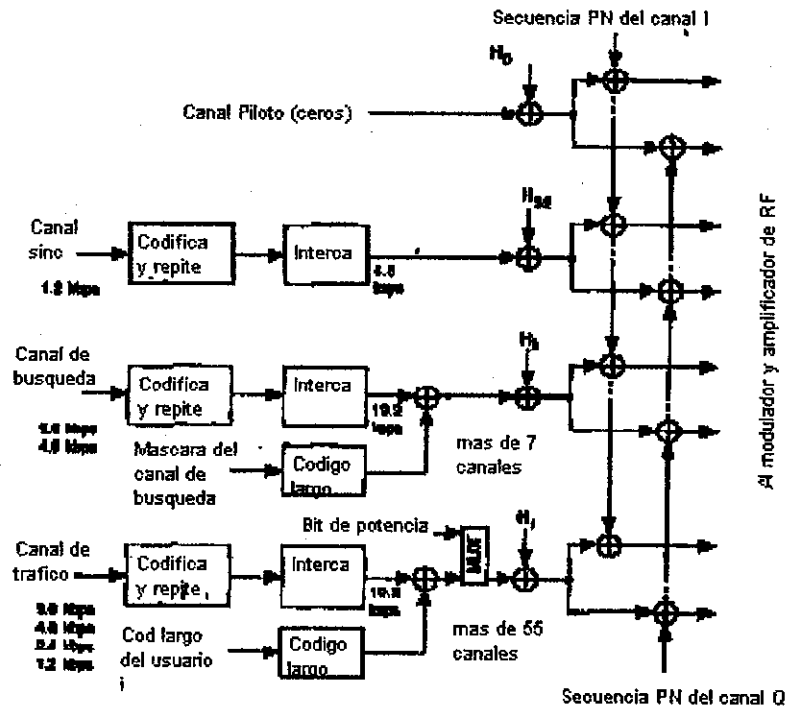


Fuente: Jhong Sam Lee. CDMA Systems Engineering Handbook. Página: 343.

3.6 Canales del enlace "forward"

La operación de multiplexación del canal "forward" se muestra en la siguiente figura:

Figura 18. Operación de multiplexación en el enlace "forward"



Fuente: Jhong Sam Lee. CDMA Systems Engineering Handbook. Página: 344.

Los canales del enlace "forward" consisten de un canal piloto, uno de sincronía, canales de búsqueda, así como canales de tráfico, como se muestra en la figura. Cada canal es modulado por una secuencia Walsh específica, denotada H_i , $i=0,1,\dots,63$. Los estándares IS-95 asignan H_0 para el canal piloto, H_{32} para el canal de sincronía, del H_1 al H_7 se utilizan los canales de búsqueda, y los restantes H_i para canales de tráfico. Es importante notar que los canales I y Q con secuencia PN están simultáneamente modulados en cuadratura en el canal "forward".

3.6.1 Canal piloto y su código PN

El canal piloto es utilizado primordialmente como una referencia de fase en la demodulación de los otros canales, por lo que en los estándares IS-95, se requiere que la temporización y la fase de la portadora de los demás canales en el enlace forward estén bien relacionados con este canal piloto. El canal piloto es fácilmente tomado por el móvil, pues no tiene que demodular datos sino que únicamente los códigos PN. En vista de que el canal piloto es muy importante en la temporización del sistema, se transmite a un nivel de potencia alto, comparado con los otros canales.

Los datos del canal piloto son modulados a una velocidad de 1.2288 Mcps con H_0 , la fila 0 de la matriz Hadamard de 64×64 , la cual consiste de una secuencia Walsh de 64 ceros; de este manera no es modulación del todo.

Los dos códigos cortos PN distintos que se discutieron anteriormente son generados por 15 etapas de registros inversores linealmente realimentados, y son alargados por la inserción de un código por periodo en una especifica localidd de la secuencia PN. Así este código corto PN tiene un período igual a la longitud de la secuencia normal $2^{15} - 1 = 32,767$ más un código que da como resultado 32,768, donde como se discutió anteriormente, cada estación base es diferenciada por un compensador de fase distinto θ_i de los canales I y Q. Cada código de compensación es un múltiplo de 64, lo cual nos da $32,768/64 = 512$ posibles códigos de compensación de 64.

A una velocidad de 1.2288 Mcps, las secuencias I y Q se repiten cada 26.66 ms. Los polinomios característicos de las secuencias I y Q son:

$$f_i(x) = 1 + x^2 + x^6 + x^7 + x^8 + x^{10} + x^{15}$$

$$f_Q(x) = 1 + x^3 + x^4 + x^5 + x^9 + x^{10} + x^{11} + x^{12} + x^{15}$$

Estas pueden ser generados utilizando generadores de registros inversores (con sus siglas en inglés MSRSG).

3.6.2 Canal de sincronía

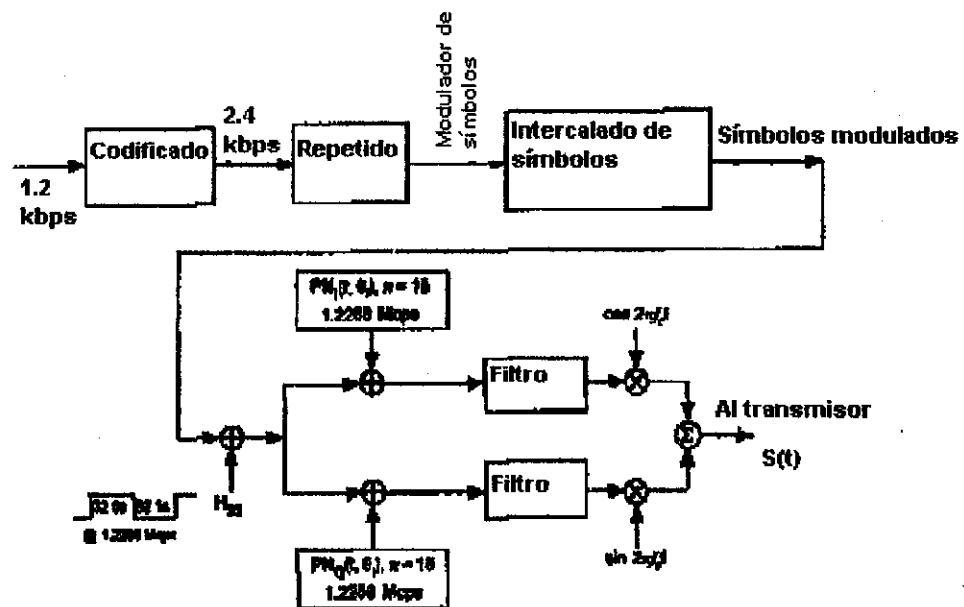
El canal de sincronía es demodulado por todos los móviles, puesto que contiene información sobre la sincronía del sistema, donde dicha información es difundida repetidamente a todos los móviles. Dicha señal está identificada para cada estación base, y comunica información de sincronía dentro del código PN largo; esto lo hace a una velocidad de 1.2 kbps. Note que la trama del canal de sincronía es del tamaño de un código PN corto; de hecho el canal de sincronía está alineado con estos periodos, por lo que una vez el móvil se engancha al canal piloto de una estación base, el móvil tendrá información de temporización, a través del canal de sincronía. Esta información que contiene el canal de sincronía contiene un código de control de error, que se logra a través de un código de convolución a una razón de $\frac{1}{2}$, donde dicha operación da como resultado un código binario de $2 \times 1.2 \text{ kbps} = 2.4 \text{ kilo-simbolos/seg (kbps)}$ ó 64 códigos por trama.

Por cuestiones de prevención en desvanecimientos de la señal, se intercalan códigos de recuperación de datos, y también se utiliza diversidad de tiempo en el canal de sincronía.

El canal de sincronía contiene información importante para que el móvil sea capaz de obtener información de sincronización. Luego de que la sincronía se ha establecido, el móvil puede recibir información del canal de búsqueda, y transmitir en el canal de

acceso. Como se menciono anteriormente, el canal de sincronía esta dividido en tramas de 26.66 ms, convenientemente idéntico al periodo de los códigos PN cortos, de donde tres de estas tramas forman una super-trama de 80 ms. Todos los canales de sincronía y por lo tanto los de sincronía de las super-tramas empiezan al mismo tiempo que las secuencias de códigos PN cortos. Así cuando se obtiene el canal piloto, se sabe el inicio de la secuencia PN, por lo que también se sabe el inicio de la trama del canal de sincronía. El mensaje de sincronía empieza al inicio del canal de sincronía de las super-tramas, como se muestra en la figura de abajo.

Figura 19. Esquema del canal de sincronía



Fuente: Jhong Sam Lee. CDMA Systems Engineering Handbook. Página: 348.

La sincronía del sistema y el estado del código largo, que se dan en el mensaje, son válidos desde el inicio de la cuarta super-trama, luego del contenido del mensaje de la última super-trama. La sincronía del sistema está con referencia al cero de compensación de la super-trama.

Luego de recibir el mensaje del canal de sincronía, el inicio registro de código largo se puede saber. Estos datos son cargados por el móvil en su registro inversor de códigos largos. Con dicho generador de códigos largos corriendo, el móvil podrá acceder al sistema cuando lo necesite. Esto también le será útil para poder detectar el inicio de las tramas de los canales de búsqueda y los canales de tráfico, que coinciden con el inicio de las super-tramas.

3.6.3 Canales de búsqueda

Los canales de búsqueda son utilizados para alertar al móvil de sus llamadas entrantes; también para comunicarle de los canales asignados para el establecimiento de la conversación, y para la transmisión de información de los encabezados del sistema. La información del canal de búsqueda se genera a velocidades de 9.6 kbps o también a 4.8 kbps. La información es codificada, repetida y entrelazada. Todos los canales de búsqueda son transmitidos a la misma potencia, y son transmitidos a la misma velocidad dentro de un mismo sistema CDMA, en contraste con la transmisión de los canales de voz, en que se varía la potencia a la que se transmite constantemente, como más adelante se podrá observar. A diferencia del canal de sincronía, la codificación y el entrelazado de la información de los canales de búsqueda son revueltos con 42 estados de secuencias de códigos PN largos que corren a 1.2288 Mcps. El código PN largo es generado por 42 estados de registros inversores.

El compensador de fase de la secuencia del código PN largo original, que es único para un específico canal de búsqueda y para una estación base en específico, se obtiene combinando la salida de los registros inversores con una máscara de 42 bits. Para los canales de búsqueda, la máscara se deriva del número de canal de búsqueda y del número de identificación de la estación base "ID".

Los datos de cada canal de búsqueda son esparcidos por su respectiva secuencia de códigos Walsh designados, correspondiente a una de las primeras siete filas de la matriz Hadamard $H_1 - H_7$, y luego es esparcido en cuadratura con los códigos PN cortos.

Un mensaje de búsqueda específico para un móvil se puede transmitir periódicamente por un canal de búsqueda, con el objetivo de que el móvil n haga una búsqueda de un posible mensaje en alguno de los canales de búsqueda.

3.6.4 Canales de tráfico

Normalmente existen arriba de 55 canales "forward" de tráfico, los cuales manejan voz digitalizada, como también los datos propios del móvil. Es posible utilizar una o más de las secuencias Walsh asignadas a los canales de búsqueda para los canales de tráfico, para un total por encima de 62 canales de tráfico, si es que el sistema se carga demasiado.

Normalmente existe una limitante en el enlace "reverse" y es la interferencia mutua que se produce en los canales hacia arriba, por lo que está limitada la cantidad de conversaciones que se pueden establecer simultáneamente. Las secuencias Walsh asignadas para los canales de tráfico van del $H_8 - H_{31}$ y del $H_{33} - H_{63}$. En dichos canales de tráfico, la voz de cada uno de los móviles es codificada trama por trama, utilizando un codificador de voz variable, que genera datos a velocidades como de 8.6, 4.0, 2.0 o 0.8 kbps, que depende de la actividad de voz. Un código de ciclo de chequeo redundante (con sus siglas en inglés CRC), para la detección de errores es utilizado, éste se hace a dos grandes velocidades, agregando 12 bits por trama, para la velocidad más alta y 8 bits para la menor.

Del lado receptor se calcula la velocidad de voz por medio del código CRC, el cual también da detección de errores, que a su vez sirve para el manejo adecuado de la potencia.

En los canales de tráfico, los datos de la voz codificada son revueltos o codificados, para poder proporcionar al sistema más privacidad en sus conversaciones, esto se logra con diferentes compensadores de fase en el código PN largo. Es muy importante notar que los diferentes móviles son diferenciados por secuencias Walsh distintas asociadas al canal de tráfico, y no por el compensador de fase del código largo.

Los datos revueltos o codificados de los canales de tráfico son intercalados con símbolos a una velocidad promedio de 800 bps, con el fin de controlar la potencia de transmisión de la estación base, como más adelante se ampliará.

La secuencia Walsh en la matriz Hadamard, que es del orden de 64 tiene la propiedad que las 64 secuencias son mutuamente ortogonales. Por esa razón una única secuencia es asignada a un canal de tráfico, por lo que del lado receptor el móvil, se podrá demodular únicamente la información que sea ortogonal a la secuencia que le fue asignada.

3.7 Descripción del enlace de reversa

En el estándar IS-95, el enlace de reversa tiene dos tipos de canales: canales de acceso y canales de tráfico. Para poder reducir la interferencia, y para el mejor manejo de la potencia del móvil, no se utiliza un canal piloto en el enlace de reversa. Un móvil

puede transmitir en cualquiera de los canales, tanto en los canales de acceso, como también en los canales de tráfico, pero nunca al mismo tiempo en ambos.

Antes de entrar en detalle sobre lo que es el enlace de reversa, es importante definir ciertos conceptos del estándar IS-95.

- **Acceso múltiple:** el acceso múltiple en los canales de reversa está basado en la división de códigos PN con la técnica de "Spread-Spectrum", por lo que los distintos móviles utilizan un compensador de fase distinto, para que sean diferenciados de los demás.
- **Cuadratura:** en el proceso del "Spread-Spectrum" en el canal de reversa; aparte de utilizarse un código PN largo, también se utiliza modulación de secuencia directa en cuadratura con los mismos dos códigos PN cortos del enlace "forward".
- **Modulación:** el tipo de modulación que se utiliza en el canal de reversa es de OQPSK.
- **Forma de los pulsos:** en el enlace de reversa, la forma de los pulsos tanto en el canal I como en el canal Q, depende de los filtros FIR.
- **Velocidad del código PN:** la velocidad del código PN en el enlace de reversa es de 1.2288 Mcps, que es 128 veces la máxima velocidad de la fuente de datos de 9.6 kbps.
- **Codificación de voz:** para la codificación de la voz en el enlace de reversa se utiliza "vocoders" o codificadores de voz con velocidad variable entre 1,200, 2,400, 4,800 y 9,600 bps, que depende de la actividad de la voz.
- **Control de errores:** el enlace de reversa utiliza una codificación de convolución de 1/3, con codificación Viterbi.
- **Intercalado:** aquí se intercalan símbolos para la detección de errores, antes de ser transmitida la información.

3.7.1 Esquema de acceso múltiple

Existe, por lo menos, un canal de reversa para cada canal de búsqueda en el enlace "forward", con un máximo de 32 canales de acceso por canal de búsqueda. Los canales de acceso son utilizados para que el móvil pueda establecer una conversación, o también para que el móvil responda a una llamada.

El número de canales de tráfico en el enlace de reversa es igual al número de canales de tráfico en el enlace "forward". En la práctica, la interferencia de unos usuarios con otros es la limitante para el número de canales de tráfico.

Cada uno de los canales del enlace de reversa se distingue por un compensador de fase distinto, que es de los mismos 42 estados que en la secuencia de código PN largo utilizado por el enlace "forward". Por lo tanto, en CDMA el enlace de reverse utiliza distintos códigos PN, mientras que en el enlace de "forward", se utiliza secuencias de códigos Walsh ortogonales para distinguir los canales.

3.7.2 Canales del enlace de reversa

Existen dos tipos de canales: canales de acceso y canales de tráfico. Los canales de acceso son utilizados por el móvil para establecer una conversación con la estación base, y para responder a mensajes que le han sido enviados por la estación base, a través de los canales de búsqueda. En el enlace de reversa, los canales de tráfico también tienen una velocidad variable en sus transmisiones que van de los 1.2 a los 9.6 kbps, como también se tiene en el enlace "forward".

3.7.3 Canal de acceso

La señal del canal de acceso es pasada por un proceso de esparcimiento de la señal con un factor de cuatro, utilizando un compensador de fase de código PN largo de 42 estados, a una velocidad de 1.2288 Mcps. El compensador de fase de la secuencia original se obtiene formando un producto interno del vector que se genera de la salida de los registros inversores, y una máscara utilizada de 42 bits. Para los canales de acceso, dicha máscara se forma de un código pseudo aleatorio, que se calcula del canal de acceso y el número de la estación base.

La transmisión en el canal de acceso, para un móvil en particular, se permite cada ciertos intervalos de tiempo, que son múltiplos enteros, con duración de 20 ms. El inicio de la transmisión de cada uno de los móviles, dentro del canal de acceso, se hace a través de un retardo aleatorio, esto es con el fin de que varios móviles puedan transmitir dentro del mismo canal de acceso. La primera vez que un móvil accesa a un canal de éstos, se hace bajo el formato de mensaje de prueba; esto es hasta cuando al móvil se le haya determinado la potencia que transmitirá.

3.7.4 Canales de tráfico

Arriba de 62 canales tráfico pueden recibir voz o datos de los móviles hacia la estación base. En dichos canales de tráfico, se utilizan "vocoder" o codificadores de voz con velocidad variable entre 0.8 y 8.6 kbps en una trama de 20 ms. Dependiendo de la velocidad de los datos transmitidos, así la trama es codificada en bloques de códigos CRC; esto es el fin de que la estación base pueda determinar si se están recibiendo errores o no.

El móvil es distinguido a través un código PN largo de compensación de 42 estados, en que el compensador es generado por una máscara que corresponde al número de serie que tiene el teléfono del móvil (con sus siglas en ingles ESN). La máscara del compensador tanto en el enlace "forward", como en el enlace de reversa, es la misma para un determinado móvil.

La transmisión de un móvil en un canal de tráfico se inicia con una serie de ceros. El mensaje del móvil a la estación base debe de ser enviado por el canal de tráfico de reversa, como también en el canal de acceso. El envío de mensajes por parte del móvil hacia la estación base se puede hacer de dos maneras: se puede sobreponer el mensaje dentro de los datos de voz en el mismo canal, o también existe un método llamado "Blank and Burst", que en español quiere decir que el móvil espera que haya un silencio en la conversación, para enviar una ráfaga de datos.

3.7.5 Control de potencia

El manejo de un gran cantidad de usuarios simultáneos es uno de los más grandes logros del sistema CDMA. Si la transmisión de cada uno de los móviles se logra ajustar, de tal manera que la relación de señal a interferencia recibida en la celda sea la mínima aceptada, entonces se lograra maximizar la capacidad del sistema. Cualquier incremento en la potencia transmitida por los móviles daría como resultado un incremento en la interferencia, y entonces el funcionamiento del sistema se vería comprometido. Por eso fue necesario implementar un sistema complejo y a la vez dinámico para contrarrestar dichos efectos.

Una de las características más importantes del sistema celular son los desvanecimientos que se producen en la señal; esto es a causa de la reflexión de la señal en varias partes, que crea así trayectorias múltiples, y se interfieren mutuamente. Dichos desvanecimientos llegan a atenuar la señal a veces hasta más de 30 dB.

En los estándares IS-95, se ha llegado a la combinación de dos métodos para contrarrestar dichos efectos: control de potencia por "open-loop" y "close-loop"

Con el sistema de "open-loop", cada móvil mide la potencia de la señal recibida del canal piloto. Con esta medición y con la información que tiene del "power-budget", que es transmitido al inicio de la sincronización, la potencia del enlace "forward" es estimada. Suponiendo que hay una pérdida por difusión en la señal en el enlace "forward", se calcula la potencia que debe tener el enlace de reversa. Para calcular la potencia del enlace de reversa, hay que tomar en cuenta la relación de señal a ruido, que nosotros estemos dispuestos a tolerar, así como también hay que tomar en cuenta la potencia de la estación base, el ruido y la interferencia en el enlace de reversa. De donde, se puede obtener la siguiente ecuación.

Potencia del móvil = constante (dB) – potencia de reversa (dBm)

En los estándares IS-95, la constante que aparece en la anterior ecuación se toma con un valor nominal de -73 dB.

Si la potencia del canal piloto, está aumentada de una forma abrupta, el móvil reduce su potencia de transmisión en cuestión de microsegundos. Pero si la señal medida en el móvil decrece de cierto umbral, entonces la potencia del móvil empieza a incrementarse de una forma lenta; esto en cuestión de mili segundos. La razón de bajar la potencia tan rápidamente es porque si en un momento dado la potencia del canal piloto mejora, es necesario que el móvil no incremente la interferencia sobre los demás usuarios.

En vista de que los desvanecimientos en el enlace de "forward" y en el enlace de reversa son independientes, se trabaja con el método de control de potencia de "close-loop". Es evidente que el calcular las pérdidas del enlace de "forward" con base en la potencia recibida por la estación base es una aproximación no muy confiable. Es por eso que en la estación base se mide la potencia de recepción, y se compara con una potencia deseada; de esa manera se genera un comando para ajustar la potencia del móvil. Si la potencia promedio recibida es más que la deseada, entonces el generador de comandos envía un "1", para indicarle al móvil que baje su potencia. Si la potencia promedio esta por debajo de la potencia deseada, entonces el generador de comandos envía un "0" al móvil para que aumente su potencia. Este incremento o disminución de la potencia en el móvil se hace en pasos de 1 dB. Con este método de "close-loop", también se verifica que la potencia de transmisión este trabajando de una forma correcta. Esto se hace por la verificación de la tasa de error que se está recibiendo; si se está recibiendo una tasa baja, entonces se le da un comando de aumento de potencia al móvil.

3.7.6 Control de potencia en el enlace "forward"

Como es de esperar, el móvil está expuesto a regiones en las que tendrá poca recepción de la señal, por lo cual tendrá errores en las tramas que reciba. En este sistema, es muy importante observar que el móvil está en capacidad de pedir que le sea aumentada la potencia por la estación base.

Cuando el control de potencia en el enlace de "forward" está activo, la estación base esta periódicamente reduciendo la potencia con la que le transmite a un móvil en particular. Esto ocurre hasta que el móvil detecta que está, recibiendo muchos errores en las tramas que recibe. El móvil reporta la cantidad de errores que recibe a la estación base. Luego con esta información recibida, la estación base puede tomar la decisión de incrementar la potencia al móvil; esto es en pasos pequeños de incremento de potencia, de 0.5 dB.

3.8 Manejo de la capacidad y funcionamiento óptimo del sistema CDMA

En un sistema celular basado en CDMA, no existe un número fijo de canales, como se puede determinar en sistema FDMA o TDMA; esto es debido que en CDMA el número de canales que soporta el sistema está limitado por el grado de interferencia, y depende del número de portadoras de CDMA con que se cuente. El sistema empieza a bloquear llamadas cuando en el enlace de reversa se llega a una potencia de interferencia, que se establece, según la calidad de señal que se desea. Esto es cuando la interferencia del total de usuarios que se recibe en la estación base excede un umbral, el sistema comienza a bloquear al próximo usuario que desee generar una llamada.

Una de las formas de disminuir la capacidad del sistema CDMA es teniendo grandes zonas de "Soft handoff". Dentro del sistema CDMA, existen los llamados "Soft handoff", que como anteriormente se había mencionado en el sistema analógico, el móvil se puede mover de un área de cobertura a otra, es decir moverse de una celda a otra. Dentro del sistema CDMA, es posible que más de dos celdas estén recibiendo información del mismo abonado. Con esto, a la hora de que el móvil desee pasar de una celda a otra, tomará primero la señal de la segunda celda antes de dejar la primera; con

esto se logra reducir la cantidad de llamadas caídas, como también reducir la potencia necesaria para la transmisión del móvil, y se logrará reducir la interferencia. Este tipo de "handoff" mejorará el funcionamiento del sistema, pero a su vez si nosotros utilizamos este tipo de "handoff" en áreas extensas, se cargará el sistema, pues hay más de una celda manejando el proceso de la llamada, por lo que se reduce la capacidad del sistema. Por eso los "Soft handoff" mejoran el funcionamiento del sistema, pero disminuyen la capacidad del sistema.

Otro aspecto importante en el buen manejo del funcionamiento del sistema es la óptima potencia que se utiliza en el canal piloto. Si nosotros estamos utilizando alta potencia en nuestro canal piloto, puede suceder que en un cierto punto se recibieran varios canales pilotos, o canales piloto de distintas celdas al mismo tiempo, lo cual puede producir llamadas caídas. Para poder evitar este problema, se puede manejar la inclinación en las antenas. Se ha visto que, en algunas ciudades, se utilizan antenas sectorizadas de 33° para reducir este problema del canal piloto.

Otro aspecto importante, que hay que tomar para el mejor desempeño de nuestro sistema, es la selección de las antenas a utilizar; esto es con el fin de que las antenas utilizadas no introduzcan ruido adicional. Por eso es importante seleccionar antenas robustas, que con el paso del tiempo no alteren su funcionamiento.

4. FUNCIONES WALSH Y LOS CÓDIGOS CRC

Las funciones Walsh de orden 64 son muy utilizadas en los estándares IS-95. Las secuencias Walsh son funciones mutuamente ortogonales, y asegurar así que la señal de un usuario determinado también es ortogonal. Con esto, se puede decir que el enlace "forward" dentro de los estándares IS-95 es un sistema "spread-spectrum" ortogonal, el cual ha sido diseñado de esta manera para eliminar interferencia producida por el acceso múltiple (con sus siglas en Inglés MAI que quiere decir "multiple acces interference").

Teóricamente la MAI se puede reducir a cero si las señales utilizadas son mutuamente ortogonales. Sin embargo, en la práctica nos encontramos que la interferencia cocanal sigue existiendo; esto es debido a que existen muchas señales producidas por las múltiples trayectorias, y también se produce interferencia por señales de otras celdas, las cuales no están alineadas en el tiempo con la señal presente. Señales que cuentan con un cierto retardo, señales fuera de sincronía, como también atenuadas; estas no son ortogonales a las que originalmente se han recibido. Dichas señales causaran interferencia. Las señales recibidas de otras celdas no están en sincronía con la celda local, por lo que causaran interferencia.

Para reducir esta interferencia, cada canal del enlace "forward" emplea una secuencia de códigos PN, la cual está en sincronía con el reloj que genera la secuencia ortogonal Walsh. La eliminación de la interferencia es debido a la ganancia de proceso que tiene cada canal.

En los estándares IS-95 en el canal de reversa, también se utilizan las funciones Walsh al igual que en el enlace "forward". Sin embargo, la forma en que se utilizan las funciones Walsh en cada uno de los enlaces es muy distinta. En el enlace de reversa, se utiliza la secuencia Walsh como modulación de códigos ortogonales, que depende únicamente del patrón de datos. Mientras que en el enlace "forward", las secuencias Walsh son utilizadas con el fin de diferenciar canales idénticos, en el enlace de reversa, son utilizadas como palabras de códigos ortogonales.

4.1 Funciones Walsh

En 1923, J. L. Walsh publicó un documento sobre las funciones ortogonales, en el que definía un sistema de funciones ortogonales. Cada función tenía únicamente valores de +1 o -1, excepto en puntos discontinuos, donde la función tomaba el valor de cero. Walsh estableció que las funciones tendrían que ser ortogonales, normales y completas. Al decir "ortogonal", quiere decir que si se multiplican dos funciones distintas y luego se integran sobre un intervalo, dará como resultado cero. El término "normal" quiere decir que las dos funciones iguales, y que al ser integradas darán como resultado la unidad. Finalmente de una forma aproximada se puede decir que el término "completa" quiere decir que un conjunto de funciones ortogonales se pueden expresar como una combinación lineal de funciones. A continuación, se describen algunas de las propiedades de las funciones Walsh:

- $W_j(t)$ toma un valor entre $\{+1, -1\}$, excepto en algunos puntos donde toma el valor de cero.
- $W_j(0) = 1$ para toda j .

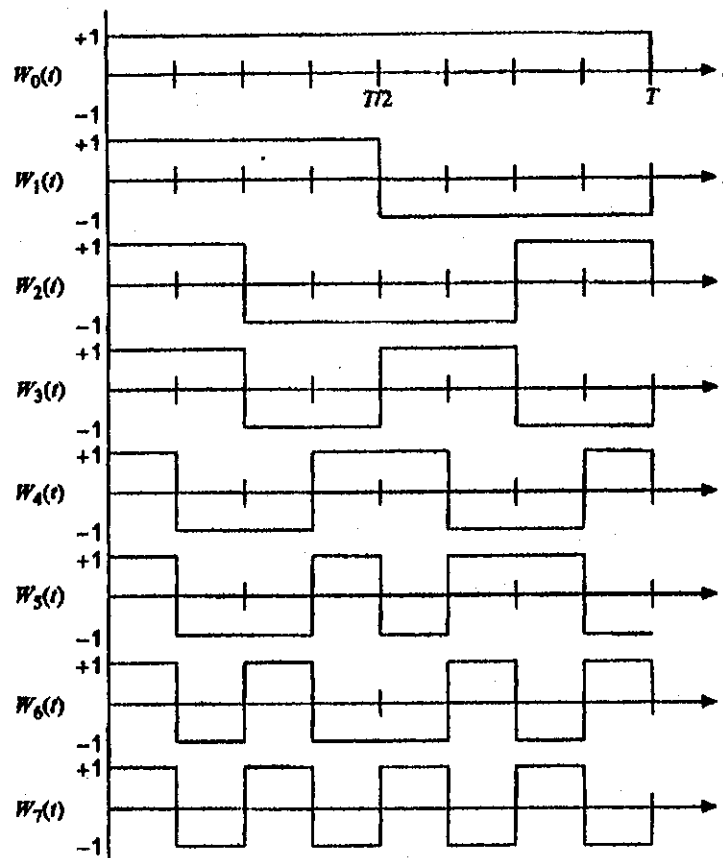
- $W_j(t)$ tiene precisamente j cruces por cero en la señal en el intervalo de $(0, T)$
- $$\int_0^T W_j(t) W_k(t) dt = \begin{cases} 0, & j \neq k \\ T, & j = k \end{cases}$$
- Cada función $W_j(t)$ puede ser par o impar respecto al punto medio del intervalo.

Un juego de funciones Walsh, consiste de N funciones, y éstas son ordenadas de acuerdo con el número de cruces por cero que éstas tengan (o sea cambios en la señal), o sea:

$$\{W_0(t), W_1(t), \dots, W_j(t), \dots, W_{N-1}(t)\}$$

la primera función $W_0(t)$ no tiene cruces por cero dentro del intervalo completo de $(0,1)$, donde $W_1(t)$ tiene un cruce por cero dentro del intervalo. A continuación, se muestra la forma de una función dentro del intervalo $(0, T)$. Aquí se puede apreciar claramente que es una función Walsh de orden 8.

Figura 20. Función Walsh dentro del intervalo (0,T)



Fuente: Jhong Sam Lee. CDMA Systems Engineering Handbook. Página: 428.

- Cada una de las ocho funciones toman un valor de entre $\{+1, -1\}$
- Cada función empieza con el valor +1, que es $W_j(0) = 1$ para $j=0,1,\dots,7$.
- El índice de enteros de $W_j(t)$, $j = 0, 1, \dots, 7$, cuenta el número de cambios en la señal de cada función.
- Podemos observar para cada pareja la ortogonalidad de las funciones:

$$\int_0^T W_j(t) W_k(t) dt = T\delta_{jk}, j, k = 0, 1, \dots, 7$$

donde δ_{jk} la delta Kronecker.

- Las funciones $W_0(t)$, $W_2(t)$, $W_4(t)$, y $W_6(t)$ son funciones pares, respecto al punto medio del intervalo; $t = T/2$, donde $W_1(t)$, $W_3(t)$, $W_5(t)$, y $W_7(t)$ son las funciones pares con respecto al punto medio $t = T/2$.

Las funciones Walsh se puede generar de distintas maneras; a continuación se describirá una de las formas para poder generar estas funciones Walsh, que es por medio de las matrices Hadamard.

4.2 Matrices Hadamard

La matriz Hadamard es un arreglo cuadrado de mas unos y menos unos $\{+1, -1\}$, los cuales son filas y columnas mutuamente ortogonales. Aquí se puede reemplazar los "+1" por "0" y los "-1" por "1", con el fin de expresar la matriz Hadamard con lógica de elementos $\{0, 1\}$. La matriz Hadamard de 2×2 de orden 2 es:

$$H_2 = \begin{bmatrix} +1 & +1 \\ +1 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 00 \\ 01 \end{bmatrix}$$

Si H_N es una matriz $N \times N$, entonces:

$$H_N H_N^T = N I_N$$

Donde I_N es una matriz identidad de $N \times N$. Si $N \geq 1$, entonces es el orden de la matriz Hadamard, por lo que $N = 1, 2$ o $4t$, donde t es un entero positivo. Si H_a y H_b son matrices Hadamard de orden a y b , respectivamente, entonces $H_a \times H_b = H_{ab}$, la cual será una matriz Hadamard de orden ab ; esto se encuentra sustituyendo H_b por $+1$ (o

será una matriz Hadamard de orden ab ; esto se encuentra sustituyendo H_b por $+1$ (o lógica 0) en H_a y $-H_b$ (o el complemento de H_b) por -1 (o lógica 1) en H_a . Por lo que si N es de potencia dos, y se sobreentiende que $H_1 = [+1] \equiv [0]$, entonces H_{2N} se puede encontrar de la siguiente manera:

$$\mathbf{H}_{2N} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_N & \mathbf{H}_N \\ \mathbf{H}_N & \mathbf{H}_N \end{bmatrix}$$

Donde H_N es el negativo (complemento) de H_N . Matrices Hadamard de orden $N = 2^l$, pueden ser formadas multiplicando repetidamente la matriz Hadamard de forma normal $N = 2$, por ella misma.

4.3 Detección de errores por el método polinomial o de comprobación por redundancia cíclica (CRC)

Este método permite la verificación de todos los bits del mensaje, mediante la utilización de un determinado algoritmo matemático.

Básicamente, consiste en dividir en el equipo transmisor el mensaje de información que se quiere enviar por un polinomio conocido, denominado "generador" (que debe ser el mismo en el transmisor y receptor).

Como resultado de esta división, se obtendrán dos polinomios denominados "cociente y resto".

En el receptor, se recibe el polinomio "resto" y el mensaje.

Este último, se divide por el polinomio "generador" y se compara el polinomio "resto" así obtenido, con el que se ha recibido desde el transmisor.

Si no ha habido *errores*, ambos polinomios deben ser iguales.

Este método se basa en la detección de errores por medio de operaciones aritméticas con polinomios, por medio de la técnica conocida como de módulo 2.

En ella, no hay términos de acarreo para la suma, ni de préstamo para la resta; estas operaciones son del tipo conocidas como "OR EXCLUSIVO".

Veamos un ejemplo de suma y una resta según este método:

- Ejemplo de suma.

$$\begin{array}{r} 11101001 \\ \underline{10011100} \\ 01110101 \end{array}$$

- Ejemplo de resta.

$$\begin{array}{r} 11010001 \\ \underline{10010110} \\ 01010111 \end{array}$$

Por otra parte, un mensaje de tipo 11011011, sería asimilable a un polinomio del tipo:

$$1.X^7 + 1.X^6 + 0X^5 + 1.X^4 + 1.X^3 + 0X^2 + 1.X^1 + 1$$

En donde la forma de ejecutar el procedimiento tiene los siguientes pasos:

- Se define un polinomio $M(x)$ de grado n , a transmitir.
- Se define un polinomio $G(x)$ de grado r (generador).
- Se define un polinomio auxiliar del mismo grado que el generador de la forma x^r
 - Debe ser $n > r$
 - Se forma un polinomio que contenga $(r + n)$ bits, de la forma: $M(x) x^r$ (recordando que $M(x)$ es de grado n).
 - Se divide el nuevo polinomio formado de la forma: $M(x) x^r$ por el polinomio generador $G(x)$ (empleando el álgebra de módulo 2).
 - De dicha división, se obtendrá un polinomio resto $R(x)$ (que siempre deberá tener un número de bits igual o menor que "r")
 - Se procede finalmente a obtener un polinomio que se denominará $T(x)$, que es finalmente el polinomio a transmitir.

Este resulta de restar, mediante el método antes señalado de módulo 2, los bits correspondientes al polinomio $M(x) x^r$, los correspondientes al polinomio resto $R(x)$

Por lo tanto, los pasos serán:

$$1^\circ X^r M(x) \div G(x) = C(x) + R(x)$$

Donde:

$C(x)$ es el cociente de la división que no tiene utilidad alguna.

$$2^{\circ} T(x) = X^r M(x) - R(x)$$

3° Como se puede observar, el polinomio $T(x)$ sería siempre divisible por el "polinomio generador" $G(x)$.

4° Si se introducen errores en la transmisión, se recibirá:

$$T(x) = T(x) + E(x)$$

Donde $E(x)$ será la componente de error y entonces el polinomio recibido, deja de ser divisible por el polinomio generador, siempre que este último sea bien escogido (por ello el uso de estos polinomios normalizados).

En general, resultará muy poco probable que $E(x)$ no sea detectable, como se verá después.

En particular, tres polinomios se han convertido en normas usadas internacionalmente.

En los tres el término $(x+1)$ está contenido como factor primo.

- Polinomio "CRC - 16"

Un ejemplo de ellos es la norma denominada "CRC - 16", que se usa para caracteres codificados con 8 bits y cuyo polinomio generador es el siguiente:

$$P(x) = X^{16} + X^{15} + X^2 + 1$$

Este polinomio generador es capaz de detectar entre otros:

Errores simples: 100 %

Errores dobles: 100 %

Errores impares: 100 %

Errores en ráfagas

- 100 % (ráfagas menores a 17 bits)
- 99.997 % (ráfagas de hasta 17 bits)
- 99.998 % (ráfagas mayores a 17 bits)

(*) Con número impar de bits

- Polinomio normalizado por el CCITT/UIT

El CCITT con base en pruebas practicadas con diversas opciones, ha normalizado el siguiente polinomio generador:

$$P(x) = X^{16} + X^{12} + X^5 + 1$$

Donde su rendimiento es igual al anterior

- "CRC - 12"

El tercer polinomio es el denominado "CRC - 12", y está indicado para caracteres codificados con 6 bits.

Su forma es la siguiente:

$$P(x) = X^{12} + X^{11} + X^3 + X^2 + X^1 + 1$$

4.4 Corrección de errores

Hasta aquí se ha considerado solamente la detección de los errores, sin embargo, a partir de la verificación de la existencia de los mismos, se pueden adoptar dos posturas diferentes: corregirlos o no tomarlos en cuenta.

Si no se toman en cuenta los errores, se haría un enfoque trivial, pero que en muchas oportunidades, por el tipo de información que se va a transmitir y por el uso que la misma recibirá, no es imprescindible que los errores sean tenidos en cuenta. Sin embargo, en la mayoría de los sistemas teleinformáticos como en nuestro caso, la corrección de los errores es un hecho casi imprescindible.

Existen varios métodos para la corrección de errores, tales como códigos autocorrectores, los cuales se basan en códigos con suficiente redundancia, de manera que una vez que se detecta el error, se puede corregir sin necesidad de proceder a la correspondiente retransmisión.

La redundancia se extiende desde unos pocos bits, hasta llegar en algunos casos, al doble de los necesarios para transmitir un carácter.

Existen varios tipos de códigos de corrección de errores, entre los cuales se pueden encontrar los códigos Hamming.

El grupo de códigos binarios de corrección simple de errores fue descubierto en 1950 por Hamming, y fueron los primeros códigos lineales utilizados para el control de errores en la transmisión de datos digitales. A continuación, se darán las definiciones básicas de lo que es éste código Hamming; esto nos dará una comprensión del principio del funcionamiento de las técnicas de detección y corrección de errores, que se utiliza en el sistema CDMA.

Dadas dos secuencias binarias S_1 y S_2 , de la misma longitud, se denomina "Distancia de Hamming" al número de bits en que ambos conjuntos difieren.

Sea por ejemplo la secuencia S_1 , que corresponde a la letra B en el Alfabeto Internacional del CCITT/UIT.

En la tabla I se pueden observar, las secuencias, cuya "Distancia de Hamming" varia de 1 a 4.

Tabla I. Distancias de Hamming

Conjunto	Representa	Secuencia Binaria	Distancia de Hamming
S1	B	0100001	-----
S2	C	1100001	1
S3	D	0010001	2
S4	E	1010001	3
S5	U	1010101	4

La "Distancia de Hamming" está relacionada con la probabilidad de error, por lo tanto, cuanto mayor sea la distancia mínima entre los símbolos de un código dado, menor será la probabilidad de cometer errores.

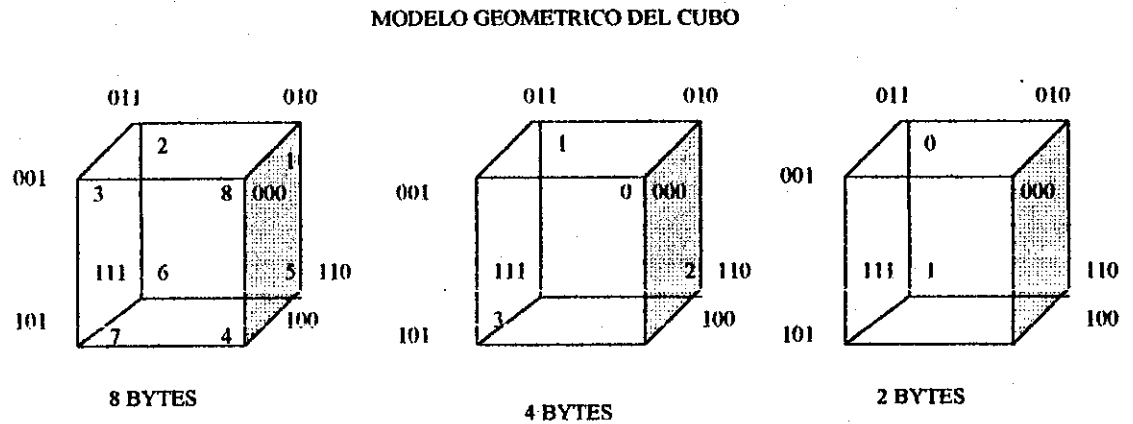
Sin embargo, aumentara la distancia de Hamming significa codificar menos símbolos con igual número de bits.

En otras palabras, al aumentar la redundancia, se logra disminuir la probabilidad de cometer errores.

Para ello se usa el ejemplo clásico de emplear un cubo, donde se podría representar en cada vértice del mismo, un código de 8 Bytes.

Supongamos que dicho código es del tipo numérico, y se usa para representar los símbolos usados en los sistemas numéricos de base octal. A continuación, se muestra dicha figura:

Figura 21.



Fuente: Garg, Vijay. Applications of CDMA systems.. Página: 251.

En el cubo de la izquierda de la figura, a cada vértice le corresponde un byte distinto, que se diferencia de los adyacentes por un dígito.

La distancia de Hamming en este caso es $H = 1$.

Para este valor de distancia, no es posible detectar ni corregir ningún error, pues al verificarse la alteración de un bit, el conjunto así obtenido corresponde a otro símbolo del código establecido.

Sí ahora consideramos el cubo central con sólo 4 bytes representados y una distancia $H = 2$, éste permitirá detectar la presencia de un bit erróneo, pero no corregirlo.

En efecto, al alterarse un solo bit y la combinación no corresponde a ningún símbolo, permite deducir que se ha cometido un error.

Los vértices adyacentes a las representaciones válidas están libres de símbolos.

Esta situación es la que se produce cuando se usa un bit de paridad, que permite detectar un error pero no corregirlo.

Si finalmente consideramos el cubo de la derecha, con solo 2 bytes representados, se tendrá una distancia $H = 3$.

Ahora, en este caso, no sólo se podrá detectar el error, sino además corregirlo, pues sabiendo que hay un solo bit equivocado se obtendrá un byte de error y la corrección correspondiente.

Luego se puede inferir que la capacidad de detección y corrección de errores es función del valor de H .

La tabla que a continuación se muestra, indica la relación entre el valor de H y la capacidad de detección y corrección de errores.

Tabla II. Detección de errores y distancias de Hamming

Distancia de Hamming	ERRORES	
	Detección	Corrección
1	No	No
2	Si	No
3	Si-(uno)	Si-(uno)
4	Si-(dos)	Si-(uno)

4.5 Código Hamming

Este código autocorrector permite detectar y corregir errores, mediante el empleo de bits de paridad con determinadas combinaciones únicas de bits de información.

Para demostrar la formación de una estructura que utiliza este código, se empleará un carácter de 4 bits (I_3 , I_5 , I_6 e I_7) de información, y se intercalarán 3 bits de verificación de paridad (P_1 , P_2 , y P_4).

El carácter de siete bits resultante será el indicado en la siguiente tabla.

Tabla III. Formato del código Hamming

Bits de información			I_3		I_5	I_6	I_7
Bits de polaridad	P_1	P_2		P_4			
Carácter resultante	P_1	P_1	I_3	P_4	I_5	I_6	I_7

La relación entre los bits de información y los de paridad están señalados en la siguiente figura.

Tabla IV. Relación entre bits de información y bits de paridad

Bits de paridad	Bits de información		
P1	I3	I5	I7
P2	I3	I6	I7
P4	I5	I6	I7

Si el carácter de 4 bits de información a transmitir es por ejemplo 0 0 1 1, en la siguiente figura, se calcula el código de Hamming equivalente al carácter original.

EJEMPLO DE APLICACIONES DEL CÓDIGO HAMMING

	I3	I5	I6	I7
CARACTER ORIGINAL	0	0	1	1

Tabla V. Tabla del código Hamming

Cálculo de bits de Paridad (PAR)	Bits de información asociados			Bits de paridad (PAR)
P1	0	0	1	1
P2	0	1	1	0
P4	0	1	1	0

Código de Hamming formado

P1	P2	I3	P4	I5	I6	I7
1	0	0	0	0	1	1

Supongamos que se produce durante la transmisión un error en el bit I₆, el cual en lugar de ser "1" Se recibe un "0".

En la siguiente figura, se detalla una tabla en la que se han dispuesto adecuadamente los bits de paridad.

Tabla VI. Indicación de la posición de errores

Bits de verificación Indicadores de uno de paridad				Posición numérica del bit erróneo
	P ₄	P ₂	P ₁	
	0	0	0	Ninguno
	0	0	1	P ₁
Indica error	0	1	0	P ₂
	0	1	1	I ₃
Indica error	1	0	0	P ₄
	1	0	1	I ₅
Bit incorrecto	1	1	0	I ₆
	1	1	1	I ₇

Se puede observar que los que tienen paridad impar, forman un número binario, que indica unívocamente la posición del bit erróneo.

En nuestro ejemplo esa combinación es 110, y corresponde al bit I₆.

Este código tiene una distancia de Hamming de tres, lo que le permite detectar y corregir un error.

Para corregir efectivamente el error, se invierte simplemente el valor del bit incorrecto recibido.

Otro código de detección de errores es el "Código de Bose-Chaudhuri", el cual tiene una distancia de $H = 5$; consecuentemente puede detectar hasta cuatro errores y corregir 2 bits.

Existen varias versiones del código, pero la primitiva preveía la introducción de 10 bits adicionales, por cada 21 bits de información transmitida.

4.6 Arquitectura del sistema CDMA

En el presente capítulo se hablara brevemente sobre el equipo utilizado en el sistema celular basado en CDMA de 800 MHz, puesto que es la banda en la que actualmente se trabaja el sistema AMPS de telefonía analógica. Dentro de la descripción del equipo que se va a utilizar, se mencionan las dos partes más importantes del sistema celular, que son las celdas y la central de conmutación.

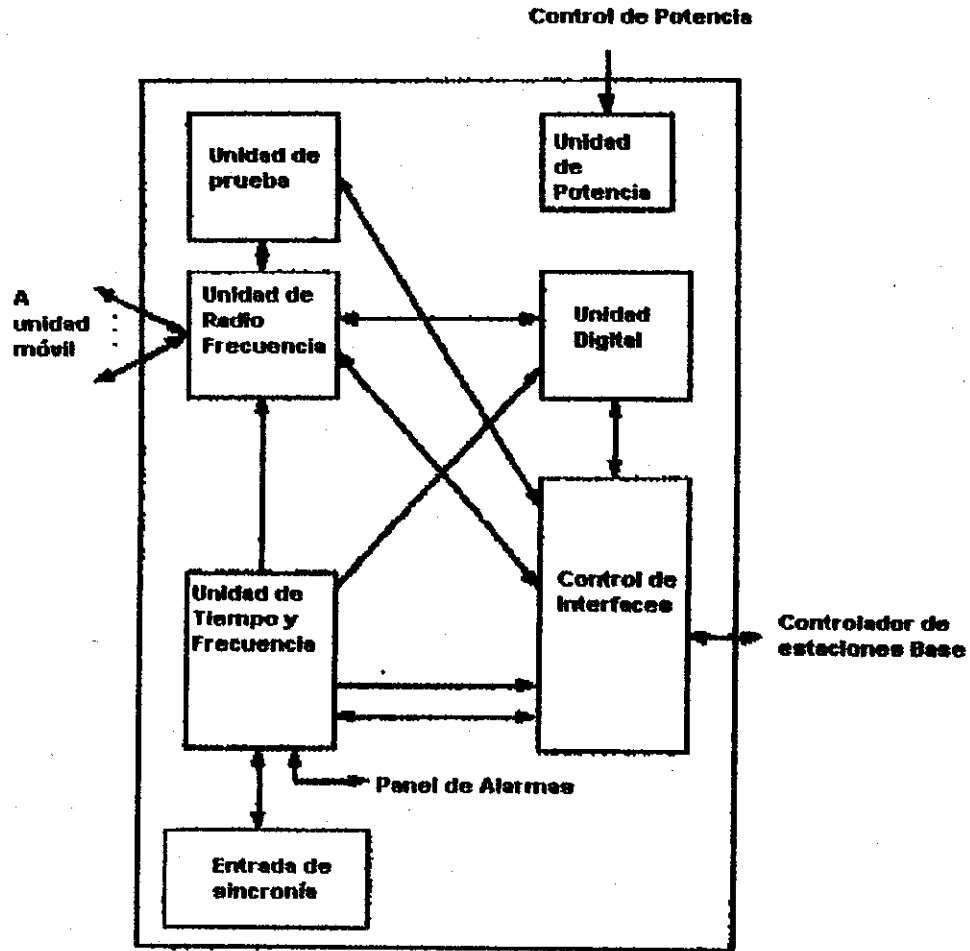
A continuación, se empezará por describir el equipamiento con el que cuenta una celda:

BTS: la BTS (Base Station Transceiver, que quiere decir transreceptores de la estación base) convierte los datos digitales en señales de RF (radio frecuencia), utilizando un procedimiento de CDMA. Dicha BTS funciona como una interface de aire entre la estación base y el móvil. Dichas BTS se encuentran localizados en los sitios de las celdas, la cual puede contener varias BTS, que trabajan a distintas frecuencias. Entre las propiedades que tiene dicho equipo, se pueden mencionar las siguientes:

- Mantenimiento y reparación en línea del equipo.
- Tiene redundancia en los equipos más importantes, tales como la fuente de poder.
- Tiene un equipo de prueba incorporado para controlar el funcionamiento de la misma.
- Dicho equipo cuenta con antenas direccionales, para aumentar la capacidad del sistema.
- Cuenta con diversidad en las antenas de recepción (o sea dos antenas de recepción).
- Dicho equipo soporta nueve portadoras de CDMA (1.25 MHz).
- Cuenta con un equipo de control de potencia en la transmisión, como también un ajustador de sensibilidad en la recepción.
- Cuenta con indicadores del estado del funcionamiento del equipo.
- Dicho equipo trabaja con un voltaje de +26 VDC.

En la figura 22, se presenta un diagrama simplificado de lo que es una BTS.

Figura 22. Arquitectura de una estación base



Fuente: Jhong Sam Lee. CDMA Systems Engineering Handbook. Página: 454.

Dicha BTS cuenta con equipo de radio frecuencias (RF), como también con un equipo digital. El equipo de RF es el que provee la modulación del enlace "Forward" y del enlace de "reversa", como también se encarga de la amplificación de la señal. Dicho equipo se llama "Unidad de radio frecuencia" (que en Inglés es RFU). El manejo de las especificaciones del sistema CDMA está a cargo de las unidades digitales. Dichas especificaciones de CDMA permiten el acceso a la misma portadora con la mínima interferencia entre los usuarios.

Dentro de dicha BTS, es necesario contar con un equipo de referencia para el tiempo y frecuencia. El equipo dentro de la BTS que nos provee de este servicio es la "Unidad de frecuencia y tiempo" (que en Inglés es TFU).

Dentro del sistema celular, existe una unidad que es la encargada de controlar el funcionamiento de las celdas en específico, y es la unidad de control de las estaciones base (que en Inglés es BSC). La interface entre dicha BSC y la BTS se encuentra a cargo de la BIU (que en Inglés quiere decir "Backhaul Interface Unit").

Dichas BTS soportan el manejo de tres sectores de antenas en la torre, los cuales se denominan: Alfa, Beta y Gama. Dichos sectores se pueden tomar como áreas de cobertura de la celda. Cada sector tiene dos antenas de recepción para la diversidad, y tiene una antena de transmisión. Cada sector de la BTS soporta como mínimo 22 llamadas simultáneas, dentro del ancho de banda de 1.25 MHz.

Dentro de la BTS, existe una unidad de prueba que se denomina BTU (que en Inglés quiere decir BTS Test Unit), que es la encargada de hacer pruebas de control y mantenimiento remoto. O sea que desde la central se le pueden enviar comandos de control y prueba a la celda.

La BTS cuenta con un equipo de potencia, que es redundante; esto es por si la energía llegara a fallar.

La BTS cuenta con una unidad digital, como se había mencionado anteriormente; dicha unidad se encarga de los procesos propios del sistema CDMA.

Otro aspecto muy importante que se debe tomar en cuenta es la central de conmutación que se puede utilizar para el sistema celular basado en CDMA. Para fines del presente proyecto, se puede trabajar con una central de conmutación que tenga la

capacidad de trabajar tanto digital como en analógico. Existe una central de marca DMS-MTX de Nortel, la cual es capaz de trabajar tanto en analógico como en digital.

Dicha central consiste de un equipo de conmutación, un equipo de control de celdas, y un equipo de interface. Dicho equipo de conmutación contiene equipo de red para conmutación, como también módulos periféricos, y equipo de mantenimiento de administración del funcionamiento del sistema. El equipo de control de celdas consta de un equipo de interface, como también un equipo de radio frecuencia y un módulo de alarmas.

La cantidad de usuarios que puede soportar la central depende de la versión del programa que se instale en la misma, como también del diseño de la red de conmutación.

5. ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA CDMA SOBRE LA ESTRUCTURA DE UN SISTEMA AMPS

5.1 Justificación

Con base en los conocimientos que se han adquirido anteriormente, sobre la tecnología celular, tanto analógica como digital, es importante explicar por qué es conveniente emigrar a una tecnología CDMA.

En años anteriores, se ha empezado a evidenciar a nivel mundial, como también en Guatemala, que la tecnología analógica basada en AMPS está llegando a su capacidad máxima, y se observa un crecimiento en el número de usuarios del servicio de telefonía celular.

Para poder emigrar a una tecnología digital, es importante tomar en cuenta que existen otras tecnologías digitales tales como TDMA. A nivel mundial, dicha tecnología basada en TDMA, se empieza a implementar alrededor del año 1992. Dicha tecnología fue lanzada al mercado oficialmente en noviembre de 1993, y vino a mejorar la capacidad del manejo de usuarios dentro del sistema celular; esto quiere decir que en un canal AMPS se podían implementar tres canales de TDMA, como también se podían tener otros servicios adicionales.

Al principio, los usuarios de telefonía celular estuvieron a gusto con el cambio a una tecnología digital, pero con el tiempo se empezó a observar un descontento dentro de los usuarios de telefonía celular digital, puesto que se observa una degradación en la calidad de voz, por lo que fue necesario mejorar la tecnología celular basada en TDMA.

Mientras que se mejoraba la tecnología TDMA, se empieza a desarrollar otra tecnología llamada CDMA. A nivel mundial, se han hecho estudios sobre dicha tecnología CDMA, y se ha llegado a la conclusión de que los esfuerzos que se pueden hacer en mejorar una tecnología como TDMA, no llegarán a superar la calidad, así como la capacidad y las funciones avanzadas que nos puede ofrecer CDMA.

En la implementación de una tecnología digital, CDMA puede ofrecer numerosos beneficios. A continuación, se presenta un resumen de los beneficios que se pueden obtener con la implementación de una tecnología CDMA

- Incremento en la capacidad:

El incremento en la capacidad de un sistema celular se puede obtener de dos maneras:

- Obteniendo más canales por MHz de frecuencia
- Reutilizando más canales por unidad de área

Dentro de la tecnología analógica, fue implementado un nuevo sistema llamado NAMPS, la cual utiliza un canal analógico AMPS y lo divide en tres, o sea obteniendo un ancho de banda por canal de 10 kHz, por lo que se logra mejorar la capacidad AMPS en un factor de 3

Por ejemplo, la tecnología GSM, que logra reutilizar el mayor número de canales por unidad geográfica. GSM (Global System for Mobile Communication) permite una relación de portadora a interferencia de 9 dB, a diferencia de AMPS que necesita como

mínimo 12 dB de relación de señal a interferencia, por lo que permite tener un mayor número de celdas en un área determinada. Dicha tecnología GSM permite tener 8 ranuras de tiempo con una portadora de 200 kHz de ancho de banda, que es una aplicación de una tecnología TDMA.

CDMA ofrece una mejora considerable en la capacidad, permitiendo una mayor reutilización de canales por unidad de área. Dicha tecnología nos permite utilizar la misma frecuencia en cada una de las celdas. Dependiendo de la configuración del sistema, se cree que CDMA viene a mejorar de 8 a 10 veces la capacidad del sistema AMPS. Es importante hacer notar que la capacidad del sistema CDMA no es uniforme, por lo que puede haber distintas capacidades en distintas celdas, como también en distintos sectores de la misma celda, según el tipo de terreno que haya en cada uno de los sectores.

Como fue mencionado en capítulos anteriores, el fin principal de utilizar un sistema celular es la reutilización de la frecuencia en un área determinada. Sin embargo, en muchas de las tecnologías celulares, no es posible hacer ésta reutilización del todo bien, pues éstas reutilizaciones causan interferencias. Esto nos hace pensar en complicados planes de reutilización de frecuencias, como es en el sistema AMPS.

Con CDMA, se puede recibir la señal con un alto contenido de interferencia, y esto no afecta el funcionamiento del sistema hasta cierto punto, con lo que se logra mantener la calidad de voz. Esto se logra en CDMA por medio de la utilización de avanzados métodos de corrección de errores.

Para la implementación de un sistema CDMA, sobre la estructura de una tecnología AMPS, es necesario empezar por limpiar espectro, esto es quitar unos canales de AMPS por celda, y con este espacio de frecuencia que queda, se puede implementar una portadora de CDMA. Para esto, es necesario tomar en cuenta que

CDMA trabaja con un ancho de banda de 1.25 MHz. Si partimos de un sistema AMPS de 3 sectores, con un patrón de reutilización de $K=7$, cada celda tendrá que perder 180 kHz de ancho de banda disponible (esto es $1.25 \div 7 = 0.180$); entonces un total de 6 canales AMPS tendrán que ser removidos de cada celda ($180 \text{ kHz} \div 30 \text{ kHz/canal AMPS} = 6$). Por lo tanto, 42 canales AMPS tendrán que ser removidos para poder meter una portadora de CDMA (esto es 6 canales para un patrón de reutilización de $K=7$ entonces $6 \times 7 = 42$).

Basados en la experiencia, se puede decir que se pueden implementar 18 canales de tráfico por sector en una celda CDMA, lo que nos da un total de 54 canales de tráfico. En vista de que se está trabajando sobre la base de un sistema con un patrón de reutilización de $K = 7$, entonces se tiene un incremento de 378 canales de tráfico de CDMA (54×7); esto es debido a que en CDMA el patrón de reutilización es $K = 1$. Con esto tenemos un incremento en la capacidad AMPS de 9 (esto es $378 \div 42 = 9$).

Primera portadora de CDMA: es importante notar que al implementar una portadora de CDMA dentro de la estructura de un sistema AMPS, es imprescindible dejar frecuencias de guarda en ambos lados de la portadora de CDMA, por lo que el ancho necesario para la portadora de CDMA se convierte en 1.8 MHz; esto es dejando un ancho de banda de guarda de 0.27 MHz de cada lado. Por lo tanto, se tendrán que perder otros 60 canales AMPS, en lugar de los 42 que se habían mencionado anteriormente ($1.8 \text{ MHz} \div .03 \text{ MHz} = 60$). Para el cambio de estos 60 canales AMPS y la implementación de los 378 canales CDMA, se tiene un incremento en la capacidad del sistema de 6.3 veces. Esto es debido a la frecuencia de guarda que se ha dejado entre los canales de CDMA y los canales de AMPS, pero con la implementación de más portadoras de CDMA, se puede llegar al incremento de la capacidad del sistema AMPS de 8 a 9 veces.

Otra forma de poder incrementar la capacidad del sistema es utilizando codificadores de voz más dinámicos. Se ha logrado determinar que en una conversación telefónica una de las personas se encuentra hablando alrededor del 35 % del tiempo, mientras que el otro 65 % del tiempo se encuentra esperando respuestas de la otra persona, o se encuentra en silencio. Con esto, se pueden implementar codificadores de voz que estén trabajando a su máxima velocidad únicamente durante el tiempo que la persona se encuentra hablando; esto es con el fin de mejorar la calidad de voz y utilizar al máximo los recursos disponibles.

- **Mejorando la calidad de las llamadas**

Como ya se había mencionado anteriormente en CDMA, se puede mejorar la calidad de voz, así como reducir al mínimo las llamadas caídas. Para lograr dichas características, CDMA se vale de las siguientes ventajas:

- Diversidad en frecuencia
- Diversidad espacial
- Diversidad en trayectoria
- "Soft Handoff", el cual también contribuye a una buena calidad de voz
- Control de potencia, con lo cual logramos una gran seguridad en cuanto a que los usuarios están transmitiendo a la potencia mínima para así disminuir la interferencia que se produce entre los usuarios
- Avanzadas técnicas de detección y corrección de errores
- Utiliza mejores codificadores de voz

- **Simplicidad en la planificación del sistema**

Todos los usuarios dentro del sistema CDMA comparten la misma frecuencia, por lo que se tiene un patrón de reutilización con $N = 1/S$

(donde S = número de sectores por celda), factor que da al sistema CDMA gran capacidad sobre AMPS y otras tecnologías. Además de darle una mayor capacidad al sistema, se puede observar que las personas encargadas del diseño del sistema no tendrán que estar haciendo complicados planes de frecuencia.

- **Conversaciones más confiables**

En otros sistemas celulares, es muy probable que alguien pueda intervenir la conversación, mientras que en CDMA es muy complicado poder intervenir una llamada. Esto se debe a que la conversación es esparcida sobre el espectro de frecuencia. Además, se piensa que en el futuro se podrá encriptar la información.

- **Mejora la cobertura**

En el caso de querer implementar un sistema digital sobre un sistema analógico ya establecido, se encuentra con el problema de que el sistema ya tiene establecido una gran cantidad de usuarios y se cuenta con un número limitado de celdas, por lo que al implementar el sistema CDMA se puede solventar éste problema, ya que en dicho sistema CDMA es necesario implementar un menor número de celdas por unidad geográfica para poder dar cobertura a dicha cantidad de usuarios.

- **Estabilidad en el tiempo de conversación**

Debido a que en CDMA los móviles se encuentran transmitiendo al mínimo de potencia posible, se puede lograr que los teléfonos puedan mantener conversaciones largas con una mayor estabilidad.

Con base en lo anteriormente discutido, se ha hecho un estudio de factibilidad, que incluye los puntos que a continuación se presentan:

5.2 Análisis de factibilidad

5.2.1 Análisis de mercado

Dentro de la empresa local de telefonía celular que aun cuenta con el sistema celular basado en una tecnología AMPS, existe un departamento de servicio al cliente, en donde se recaban las quejas que presentan los clientes. Dentro de las quejas más comunes que se tiene están las siguientes:

- Calidad de voz deficiente
- Perdidas de la llamada por problemas en "handoff"
- Perdidas de la llamada por falta de cobertura
- Problemas en el establecimiento de la llamada por falta de recursos en el sistema
- Problemas en la recepción de llamadas por falta de recursos en el sistema
- Un nivel elevado de interferencia
- Aparatos telefónicos con capacidades reducidas

Se ha observado que por lo general las personas que llaman a los teléfonos de quejas de la empresa local de telefonía celular no están dispuestas a pagar una cuota adicional por la mejora del servicio, puesto que argumentan que existe ya una empresa que presenta un servicio digital, el cual supera la calidad de servicio que actualmente se presta en la empresa, y que sobre todo cuenta con precios iguales. Y por esto se ha determinado que el emigrar a una tecnología digital se ha vuelto en una necesidad si es que no se quiere desaparecer del mercado.

5.2.2 Requerimientos de personal

Para la implementación del proyecto, será necesario contratar una compañía que sea la que provea el equipo de la tecnología a la que se desea emigrar; existen varias empresas que pueden vender dicho equipo; dentro del presente trabajo, se han obtenido precios de equipo de la empresa internacional "Motorola", que a su vez se compromete a disponer de dos Ingenieros de campo, los cuales se encargaran de la coordinación de la implementación del proyecto; el costo de dichos ingenieros asciende a \$ 80,000.00, que incluye la implementación del proyecto por completo. Para la implementación de dicho proyecto, será necesario contratar una empresa que es la que se encarga de instalar el equipo bajo la supervisión de los ingenieros asignados por Motorola. Para dicha empresa, se ha calculado un costo de \$ 48,517.00.

5.2.3 Requerimiento de maquinaria

Como anteriormente se menciona, se ha pensado en la subcontratación de una empresa, que es la que se encarga de la instalación del proyecto, por lo que no es necesario comprar maquinaria extra.

5.2.4 Sistema de transporte

Los únicos gastos en los que la empresa incurrirá es el transporte del equipo que se comprará, para éste efecto, se contratará una empresa que se dedique al manejo de carga, y luego de haber hecho algunas cotizaciones, se ha determinado que la empresa con mejor precio es la empresa de transporte "Aguilar, S.A", en donde el costo

asciende a \$ 250.00, donde el costo incluye transporte y personal para el manejo del equipo.

5.2.5 Monto pormenorizado de la inversión

Publicidad	\$.	47,500.00
Equipo para celdas	\$.	8,539,200.00
Equipo extra para la central	\$.	2,800,000.00
Contratación de Ingenieros	\$.	80,000.00
Empresas de instalación	\$.	48,517.00
Transporte del equipo	\$.	250.00

5.2.6 Capital necesario para la realización del proyecto

Para la realización del proyecto será necesario un capital que asciende a

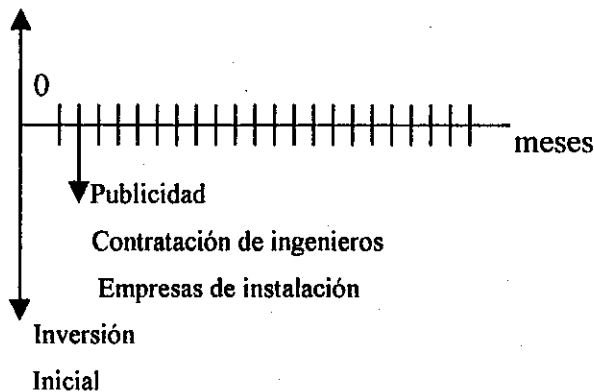
\$ 11'515,467.00

5.3 Cálculo de costos

A continuación, se presenta nuevamente una descripción de los costos en los que se incurrirá en la inversión:

Publicidad	\$.	47,500.00
Equipo para celdas	\$.	8,539,200.00
Equipo extra para la central	\$.	2,800,000.00
Contratación de ingenieros	\$.	80,000.00
Empresas de instalación	\$.	48,517.00
Transporte del equipo	\$.	250.00

En donde la publicidad, la contratación de ingenieros y la contratación de las empresas de instalación serán gastos que se tendrán específicamente al final del segundo mes. También es importante hacer notar que los equipos de celdas, equipo extra para la central y el transporte, serán gastos que se harán al inicio de la inversión (o sea serán gastos de inversión inicial). De una forma gráfica, se pueden representar los gastos de la siguiente forma:

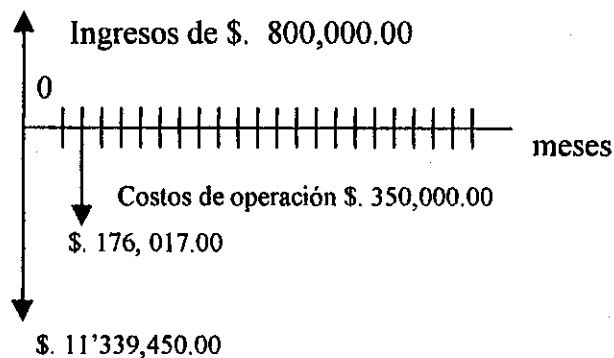


Las flechas hacia abajo indican los gastos por realizar, mientras que las flechas hacia arriba indican ingresos o ganancias de la empresa.

Además de los gastos que anteriormente se han mencionado, la empresa cuenta con otros costos de operación, los cuales se detallan a continuación:

Salarios de personal de operaciones	\$. 79,000.00
Salario del director de operaciones	\$. 6,000.00
Salario del gerente general	\$. 15,000.00
Salario trabajadores administrativos	\$. 130,000.00
Gastos de operación	\$. 100,000.00
Publicidad	\$. 20,000.00
	<hr/> <hr/>
Total:	\$. 350,000.00

Donde también se ha determinado un tráfico promedio mensual de 2'500,000 minutos, a un costo de \$. 0.32, lo cual nos viene a representar un ingreso mensual promedio de \$. 800,000.00. Donde todo lo anterior se presenta de una forma gráfica:



Debido a que la empresa cuenta con algún capital disponible, no será necesario hacer un préstamo por el monto total de la inversión; por eso se llegó a determinar que la tasa de interés promedio para empresas es del 24 % anual, con un plazo de 22 meses, en donde se hallará el interés efectivo mensual, con el que se debe pagar la deuda, para lo cual utilizaremos la fórmula siguiente:

$$I_e = \frac{\left[\left(1 + \frac{i}{n} \right)^n - 1 \right]}{12} * 100 \%$$

donde $n = 22$, $i = 24 \%$, en donde se obtuvo un interés efectivo mensual de :

$$i_e = 2.2466. \%$$

con lo cual se calculará la renta que se debe pagar mensualmente para cancelar una deuda de \$. 7'500,000.00, que es la cantidad que será necesario pedir prestada al banco, en donde el resto de el capital lo absorberá la empresa del capital con el que cuenta actualmente. Para dicho cálculo se utilizará la siguiente fórmula:

$$A = P \left[\frac{i(1+i)}{(1+i)^n - 1} \right]$$

Donde P es la inversión inicial

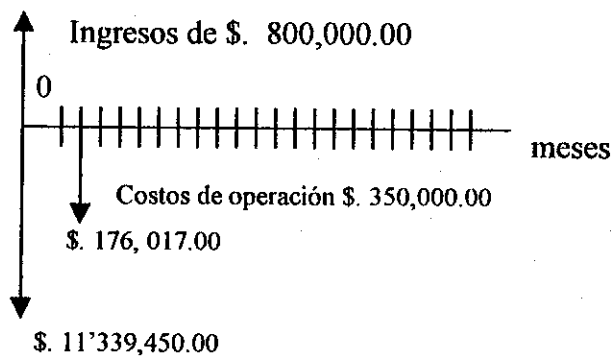
$$A = 7'500,000 (A/P, i = 2.2466 \%, n = 22)$$

$$A = 435,807.77$$

Aquí se puede observar que con los ingresos que se obtienen mensualmente se puede sobrepasar dicha cantidad, y queda un margen de seguridad, que es de $800,000 - 435,807 = \$ 364,192.23$

Por políticas de la empresa, se estima que para que un proyecto sea económicamente rentable, debe de proporcionar una utilidad entre 40 % y 60 %, por lo que se debe hallar la tasa interna de rentabilidad, con el fin de hallar dicho porcentaje. Esto es debido a que cuando el valor presente neto es igual a cero, el interés que gana el dinero invertido en el proyecto es idéntico al empleado en los cálculos.

Para averiguar la tasa interna de retorno que realmente nos proporcionará el porcentaje de ganancia que nos brindará el proyecto, se necesita uniformizar los datos, por lo que todos se trasladarán a valor presente, por medio del siguiente procedimiento:



La inversión inicial, se deja como está, puesto que ya se tiene su valor en presente. Los gastos por efectuar en el segundo mes, se trasladarán al presente utilizando la siguiente fórmula:

$$P = F (1 + i)^N$$

$$P = 176,017 (P/F, i, 2)$$

Donde i es el valor que deseamos averiguar

Y las rentas también se deben de pasar a valor presente con la fórmula siguiente:

$$VP = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right]$$

$$VP_1 = 800,000 (P/A, i, 22)$$

$$VP_2 = 350,000 (P/A, i, 22)$$

Donde i es lo que queremos hallar

Y 22 es el periodo.

$$VPN = 11'339,450 + 176,017 (P/F, i, 2) - 800,000 (P/A, i, 22) + 350,000 (P/A, i, 22)$$

Si se calcula una ganancia anual de aproximadamente un 40 % ($40/12 = 3.33 \%$), entonces se obtiene:

$$VPN = 11'339,450 + 176,017 (P/F, 3.33 \%, 2) - 800,000 (P/A, 3.33 \%, 22) + 350,000 (P/A, 3.33 \%, 22)$$
$$VPN = - 654,011$$

Si ahora se calcula un $i = 4 \%$, con el fin de encontrar el valor presente neto que éste interés da, y con esto se puede determinar el punto intermedio en el cual obtenemos una ganancia máxima, entonces:

$$VPN = 11'339,450 + 176,017 (P/F, 4 \%, 2) - 800,000 (P/A, 4 \%, 22) + 350,000 (P/A, 4 \%, 22)$$

$$\text{VPN} = 143,611$$

En donde se puede observar un cambio de signo en el valor presente neto, donde el cambio se produce entre 3 y 4 %, por lo que la tasa de interés la podemos hallar por interpolación lineal, lo cual nos arroja un resultado de 3.8793 %.

Con este interés, se obtiene una ganancia de $3.8793 \times 12 = 46.55$ % anual de ganancias, lo cual es aceptable para la empresa.

5.4 Procedimiento que se debe seguir en la realización del proyecto

Para poder implementar dicho proyecto sobre la base de un sistema AMPS ya establecido, es necesario limpiar espectro, como se explico anteriormente. Se utilizará parte del espectro disponible para implementar una portadora de CDMA, únicamente en la capital de la ciudad de Guatemala. Para poder trabajar con los usuarios, se puede implementar un tipo de celda que trabaja en ambas tecnologías, tanto CDMA como AMPS, por lo que será necesario que los usuarios de dicho servicio tengan teléfonos que trabajen en ambas tecnologías. Esto se puede hacer con ofertas, en las que a las personas que más utilicen el servicio se les puede regalar el teléfono.

Para poder implementar dicho proyecto, será necesario adquirir un equipo extra para que la central trabaje con el sistema CDMA y AMPS simultáneamente. Para dicho efecto será necesario contratar dos ingenieros especialistas en la implementación de dicho proyecto; esto es durante dos meses, para que vengan a supervisar el desarrollo de la instalación del equipo. Para la instalación del equipo, será necesario contratar a una empresa que se pueda encargar de la parte de instalación, bajo la supervisión de dichos ingenieros.

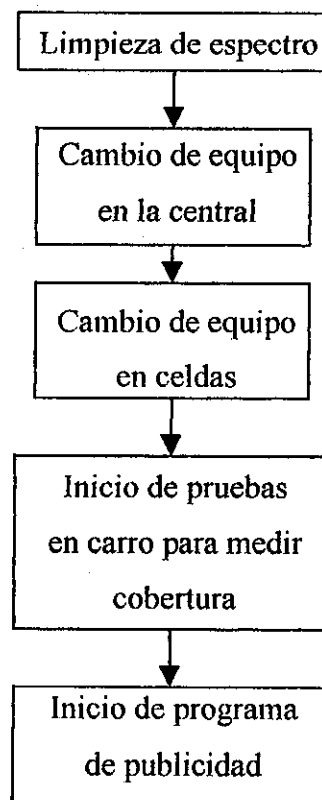
Dentro de dichos trabajos a realizar será necesario hacer cambios en la central tanto de "Software" como también de "Hardware". En los sitios de las celdas, también se harán varios cambios, los cuales estarán a cargo de dichas empresas que se contratarán.

Para la promoción del nuevo sistema digital, se llevará a cabo una estrategia publicitaria de introducción del nuevo servicio, el cual estará dividido en tres etapas. La primera parte de la estrategia publicitaria será de 15 días, la cual será

una estrategia de expectativa. La segunda parte será una estrategia formal, que durará 1 mes. Y por último, se estará trabajando con una campaña de reforzamiento, que será de 15 días.

Para dicho efecto, será necesario contratar una agencia publicitaria, que se encargara de diseñar, proponer y realizar la campaña a través de una cuenta específica.

A continuación, se presenta un resumen del procedimiento:



CONCLUSIONES

1. Con la implementación de un sistema basado en una tecnología CDMA, se logra incrementar la capacidad de dos formas:
 - a. Con la obtención de mayor números de canales por MHz de espectro.
 - b. Mayor reuso de canales por unidad geográfica.
2. La tecnología CDMA cuenta con una mayor capacidad en el control de la potencia del móvil, por lo que es posible controlar mejor la interferencia que se tiene en la celda.
3. La tecnología CDMA cuenta con varios niveles de diversidad en la recepción, por lo cual es posible tener una mejor señal de recepción en las celdas.
4. Con la implementación de un sistema basado en una tecnología CDMA, será posible contar con llamadas más continuas; esto es porque dentro de CDMA se tienen los llamados "soft handoff", que permiten mejorar la calidad en la conversación.
5. CDMA cuenta con varios algoritmos de recuperación de datos, por lo que con esto se pueden lograr llamadas más continuas y de mejor calidad.
6. La implementación de dicha tecnología es factible, debido al margen de recuperación de la inversión, y también por la necesidad del cambio de una tecnología analógica a una digital, pues actualmente dentro del mercado de las telecomunicaciones inalámbricas se tiende a la digitalización de los sistemas.

7. La disminución del costo por minuto hablado en el mercado, está compensado por el aumento en la cantidad de usuarios; por eso, la implementación de un proyecto de este tipo es financieramente realizable.

RECOMENDACIONES

1. Emigrar de una tecnología analógica con capacidades reducidas a una tecnología digital de mayor capacidad, debido a la creciente demanda del sistema de telefonía móvil celular,
2. Digitalizar la ciudad capital, lo cual se logra limpiando el espectro necesario para la implementación de una portadora de CDMA, con la cual se podría estar pasando a una tecnología digital a los clientes preferenciales de la empresa, esto debido a la complejidad en la implementación del proyecto
3. Cambiar a una tecnología digital, debido al crecimiento de la competencia dentro del mercado de telefonía móvil.
4. Es necesario que luego de que ya se implemento el proyecto por completo, se empiecen a desarrollar campañas de promoción, en las cuales los usuarios se vean atraídos por la nueva tecnología. En donde es de primordial importancia obsequiar el aparato telefónico a usuarios distinguidos.

BIBLIOGRAFÍA

1. **GARG, Vijay. Applications of CDMA in Wireless Personal Communication.** Boston: Artech House Publishers, 1996.
2. **MILLER, Leonard. System Engineering Handbook.** Boston: Artech House Publishers, 1998.
3. **SAMUELS, Sydney. Apuntes sobre preparación y evaluación de proyectos 1. Guatemala 1997.**
4. **VITERVI, Andrew. Principles of Spread Spectrum Communication.** Boston: Artech House Publishers, 1995.
5. **WILLIAM, Lee. Mobile Cellular Telecommunications Analog and Digital Systems.** California 1989.