

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



Simulación del estándar IS-95 en Matlab

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO
ELECTRÓNICO**

Presentada por:

Miguel Angel Corzo Gálvez

LIMA – PERÚ

2006

Resumen

En el primer capítulo se explica la importancia del sistema CDMA en el desarrollo de los futuros sistemas celulares y el motivo del desarrollo de esta tesis.

En el segundo capítulo se explica la evolución de la tecnología celular, en la cual fueron apareciendo diferentes tecnologías, las cuales ofrecían mejores prestaciones para el usuario final.

En el tercer capítulo se describen todas las técnicas de acceso múltiple empleados por los diversos sistemas de comunicación.

En el cuarto capítulo se desarrolla el cálculo de las pérdidas en el trayecto; de tal manera que con este cálculo se puede encontrar la cobertura de la señal. Además, se explican algunos modelos utilizados en la práctica tales como Okumura, Hata y Link Budget. También define algunos conceptos útiles para este capítulo y por último se muestra las bandas asignadas en Perú.

En el quinto capítulo se explican los temas relacionados con el estándar IS-95, la cual engloba diferentes técnicas para procesar la señal; los conceptos para entender el funcionamiento y los canales que posee en los dos sentidos downlink & uplink.

En el sexto capítulo se desarrollan los diagramas de flujo del programa principal y los subprogramas. Los subprogramas ayudan a organizar las tareas de cada una de las técnicas utilizadas simular el estándar, de tal manera que el programa principal haga uso de los subprogramas para el procesamiento de la señal. Adicionalmente, en este capítulo se explica las pérdidas de datos en la codificación de la voz, la clave de la técnica del CDMA con ayuda de la correlación de las secuencias pseudoaleatorias y por último un manual, donde explica cómo se debe usar el programa.

En el séptimo y octavo capítulo se presentan las observaciones y recomendaciones que se observaron durante el desarrollo del trabajo de tesis.

En el noveno capítulo se dan las referencias bibliográficas utilizadas para el desarrollo de la tesis, cabe destacar que la mayor fuente de información fue Internet. Al final de la tesis se muestra un pequeño glosario de las palabras técnicas empleadas en la tesis.



Dedicatoria

A mis padres

Brevemente resumiré mi actitud en el transcurso de mi vida, ó lo que siempre he tratado de conseguir.

Durante mis años escolares, la materia que más me interesaba fue la matemática. Esta inclinación se reflejaba en mis calificaciones. En consecuencia, tenía la seguridad de estudiar una carrera relacionada con las ciencias y la tecnología. Así, ingresé a la Pontificia Universidad Católica del Perú sin necesidad de dar el examen de ingreso por medio del Centro Pre Universitario de la PUCP.

Escogí a esta Universidad porque en mi interior siempre buscaba los retos, además la PUCP me ofrecía más ayuda que otras, ya sea en infraestructura, bibliotecas, compromiso hacia los alumnos y ambientes adecuados. Quizás por eso tuve la suerte de encontrar a compañeros con los que congeniaba y compartía ideas.

Durante mi etapa universitaria, me inscribía en cursos libres para ampliar mis conocimientos. Aún habiendo terminado la carrera continuaba matriculándome en cursos de tecnologías.

Al concluir mis estudios en la universidad Católica comencé a trabajar en TELEFÓNICA MOVILES S.A.C. , la empresa líder en el Perú en las comunicaciones móviles, donde laboré en el área de control de calidad de los terminales.

Mis padres siempre me apoyaron en mas del 100%. Ellos constituyeron la columna vertebral de mi formación. Sin ellos no estaría escribiendo esto ahora. Por eso les estoy eternamente agradecido y dedico esta tesis a ellos.

ÍNDICE

DEDICATORIA

INTRODUCCIÓN

RESUMEN

CAPITULO 1.- OBJETIVOS

1

CAPITULO 2.- HISTORIA A LOS SISTEMAS CELULARES

3

1.- Comunicaciones Móviles de Primera Generación

3

2.- Comunicaciones Móviles de Segunda Generación

5

3.- Comunicaciones Móviles de Tercera Generación

8

CAPITULO 3.- ACCESOS MÚLTIPLES

11

1.- Acceso Múltiple por División en Frecuencia (FDMA)

11

2.- Acceso Múltiple por División del Espacio (SDMA)

11

3.- Acceso Múltiple por Salto de Frecuencia (FHMA)

12

4.- Acceso Múltiple por División en Tiempo (TDMA)

12

5.- Acceso Múltiple por División de código (CDMA)

13

6.- Operaciones Dúplex

16

6.1- Dúplex por División de Frecuencia (FDD)

16

6.2.- Dúplex por División de Tiempo (TDD)

16

CAPITULO 4.- RADIO PROPAGACIÓN

17

1.- El espectro y la onda de espacio

17

2.- Definiciones útiles

20

3.- Propagación en el espacio libre

22

4.- Atenuaciones en el medio ambiente

25

5.- Métodos para determinar el área de cobertura

25

5.1.- Modelo de Okumura

25

5.2.- Modelo Hata

27

5.3.- Link budget (Presupuesto de link)

28

6.- Bandas de frecuencias asignadas en Perú

29

CAPITULO 5.- ESTÁNDAR IS-95 CDMA

30

1.- Principios básicos

30

2.- Modelo del sistema

31

3.- Códigos Ortogonales

33

4.- Secuencias Pseudo aleatorias (PN)

35

5.- Sincronismo

38

6.- Chequeo de Redundancia Cíclica (CRC) y relleno de trama y codificador convolucional

41

7.- Entrelazado (Interleaving)	44
8.- Canales en el enlace directo (Forward Link)	47
8.1.- Canal Piloto	48
8.2.- Canal de Sincronismo	50
8.3.- Canal de Búsqueda	51
8.4.- Canal de Tráfico	53
9.- Canales en el enlace inverso (Reverse Link)	55
9.1.- Canal de Acceso	55
9.2.- Canal de Tráfico	57
10.- Probabilidad de error	58
11.- Diversidad de Handoff	62
12.- Receptor Rake	64
13.- Control de Potencia	65
13.1.- Lazo Abierto	66
13.2.- Lazo Cerrado	67
14.- Reuso frecuencial	68
15.- Codificación del canal de voz	69
16.- Mos	72
<u>CAPITULO 6.- IMPLEMENTACIÓN Y SIMULACIONES</u>	73
1.- Algoritmo del estándar IS-95 CDMA	73
2.- Programas en Matlab	81
3.- Pérdidas en las señales de voz	81
4.- Resultados de las psecuencias pseudoaleatorias correlacionadas	83
5.- Manual	85
<u>CAPITULO 7.- CONCLUSIONES</u>	93
<u>CAPITULO 8.- OBSERVACIONES</u>	94
<u>CAPITULO 9.- RECOMENDACIONES</u>	96
<u>CAPITULO 10.- BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS</u>	97
<u>GLOSARIO</u>	99
<u>ANEXOS</u>	

Índice de figuras

- Figura 1. 1 - Carrera a 3G**
- Figura 2. 1 - Servicio extremo a extremo Seamless**
- Figura 3. 1 – Acceso múltiple por división de tiempo**
- Figura 3. 2 – Acceso múltiple por división de código**
- Figura 4. 1 – Potencia radiada en una superficie**
- Figura 4. 2 – Bandas de operadores telefónicos**
- Figura 5. 1 – Sistema de interconexión**
- Figura 5. 2 – Bandas de frecuencias**
- Figura 5. 3 – Primera portadora**
- Figura 5. 4 Ejemplo de código Walsh**
- Figura 5. 5 – Diagrama esquemático del polinomio generador de las secuencias**
- Figura 5. 6 – Máscaras para determinar las secuencias**
- Figura 5. 7 – Sincronismo serial**
- Figura 5. 8 – Sincronismo paralelo**
- Figura 5. 9 – Chequeo de redundancia cíclica**
- Figura 5. 10 - Tramas del canal de tráfico según su velocidad**
- Figura 5. 11– Codificador convolucional del enlace directo (Forward Link) de $r=1/2$ y $k=9$**
- Figura 5. 12 – Codificador convolucional del enlace inverso (Reverse Link) de $r=1/3$ y $k=9$**
- Figura 5. 13 - Entrelazado (Interleaving)**
- Figura 5. 14 – Canales en el enlace directo (Forward Link)**
- Figura 5. 15 – Canal piloto**
- Figura 5. 16 – Trama del canal de sincronismo**
- Figura 5. 17 – Canal de sincronismo**
- Figura 5. 18 – Canal de Búsqueda**
- Figura 5. 19 – Canal de Tráfico**
- Figura 5. 20 – Canal de acceso**
- Figura 5. 21 – Canal de tráfico**
- Figura 5. 22 – Probabilidad de error**
- Figura 5. 23 - Handoff**
- Figura 5. 24 – Receptor Rake**
- Figura 5. 25 – Control de potencia**
- Figura 5. 26 – Tramas de Control**
- Figura 6. 1 – Diagrama de bloques del proceso del CDMA**

Figura 6. 2 – bloque: ESCOGER ARCHIVO CON SU RESPECTIVA RUTA A SEGUIR ('N' VECES)

Figura 6. 3 – bloque: CALCULOS EN GENERAL

Figura 6. 4 – bloque: VOCODER Y CUANTIFICACION

Figura 6. 5 – bloque: CRC

Figura 6. 6 – bloque: RELLENO Y CODIFICADOR CONVOLUCIONAL

Figura 6. 7 – bloque: IDENTIFICACIÓN DE LA ESTACIÓN BASE EN DONDE ESTÁ LA ESTACIÓN MÓVIL

Figura 6. 8 – bloque: SUMATORIA DE LOS USUARIOS (DATOS) PRESENTES EN CADA ESTACIÓN BASE Y GRAFICARLOS

Figura 6. 9 – Gráfica de la voz

Figura 6. 10 – Voz codificada

Figura 6. 11 – Voz Cuantificada

Figura 6. 12 – Autocorrelación en bipolar

Figura 6. 13 – Detalle de la Figura 6. 12

Figura 6. 14 – Autocorrelación en binario

Figura 6. 15 Elección de la cantidad de usuarios

Figura 6. 16 Datos del sistema

Figura 6. 17 – Escoger el archivo de voz

Figura 6. 18 Trazado de la ruta

Figura 6. 19 – Ejemplo

Figura 6. 20 – Resultado

Figura 6. 21 - Cobertura

Introducción

El avance tecnológico en los sistemas de comunicaciones celulares ha ido incrementando la capacidad de usuarios dentro de un área de cobertura y un adecuado uso del espectro radioeléctrico, la técnica CDMA fue elegida para esta simulación debido a que permite un aumento de capacidad de los enlaces móviles mediante la reutilización de frecuencias, la detección de actividad de voz y por sus calidades de partición del espectro de frecuencia.

Con esta técnica se puede transmitir y recibir varias comunicaciones en un mismo ancho de banda, las cuales se encuentran separadas por medio de códigos ortogonales, facilitando además una mayor probabilidad de recuperar la información. De manera que la capacidad de los enlaces móviles aumenta.

Entre otras técnicas el estándar IS-95 contempla la detección de actividad de voz; la que permite no ocupar ancho de banda innecesario cuando no hay señales de voz que transmitir. Por lo tanto las demás señales sufre menos interferencia debido a la ausencia de voz en la comunicación de un enlace móvil.

Esta técnica puede ser utilizada en combinación con otras técnicas como el FDMA, TDMA ó el SDMA, mejorando el performance y capacidad de un sistema.

En nuestro país, CDMA es la tecnología celular que predomina en el mercado. Además las nuevas tecnologías utilizan esta técnica para aprovechar sus ventajas.

Este trabajo servirá para entender en detalle el funcionamiento, las técnicas empleadas y el grado de protección del mensaje transmitido. La simulación permitirá entender el tratamiento que se le da a las señales que recibe un celular.

CAPITULO 1.- OBJETIVOS

La evolución de los sistemas de telefonía celular nos sitúa actualmente en su Tercera generación (3G), cuyas características son las siguientes:

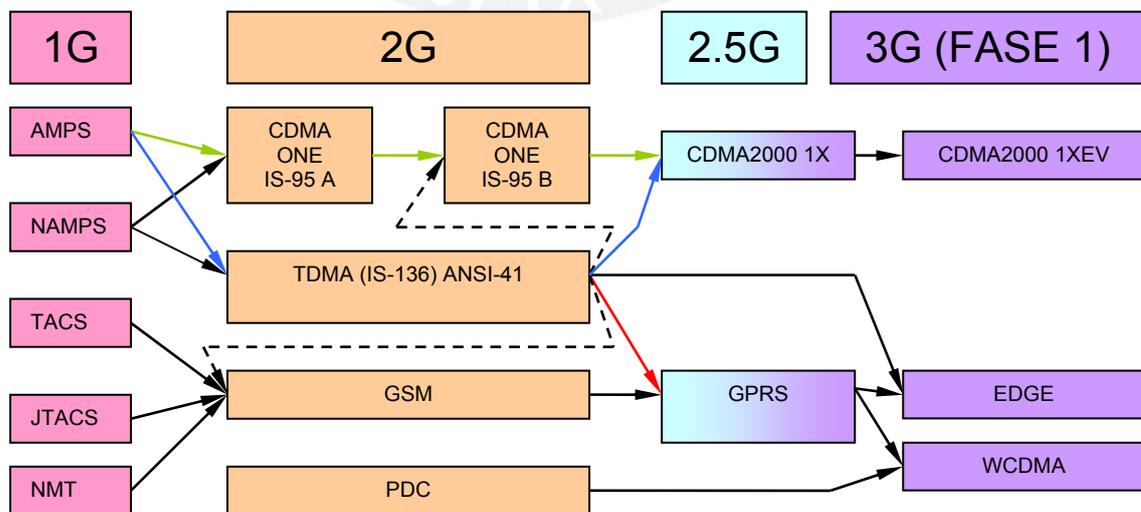
- Comunicación de voz,
- Envío y recepción de mensajes de texto (SMS),
- Envío y recepción de sonidos e imágenes (MMS),
- Envío y recepción de correos electrónicos,
- Transferencia de archivos,
- Juegos interactivos,

Que se obtienen desde cualquier equipo móvil, en cualquier momento y de manera inalámbrica, gracias a la transmisión de alta velocidad.

Los sistemas de telecomunicaciones móviles 3G aprovechan de una forma más eficiente el espectro radioeléctrico, brindando al usuario servicios móviles con mayor capacidad de ancho de banda y servicios multimedia. Al ser un acceso móvil de alta velocidad se puede combinar con servicios basados en el protocolo de Internet para conectarse a esta red y aprovechar los servicios que esta brinda.

Esta nueva generación de sistemas utilizará una técnica de acceso del tipo CDMA: ya sea CDMA2000 o WCDMA y pretende poder garantizar la calidad en las comunicaciones.

CARRERA A 3G



Fuente propia

Figura 1. 1 - Carrera a 3G

No obstante la mejor manera de entender el funcionamiento de la tecnología 3G es explicando el sistema IS-95 CDMA, el cual es una de las tecnologías base de la tercera generación.

En la vida cotidiana no es fácil percatarse del uso del interface aire a pesar de que estamos rodeados de estaciones radiobases que emiten señales electromagnéticas. La presente tesis está orientada a mostrar que es lo que ocurre en el interface aire o espectro radioeléctrico del sistema CDMA; específicamente grafica las potencias de las ondas del sistema con relación al tiempo.

Nuestro estudio se resume en un programa de simulación del protocolo CDMA, el cual, está hecho con el programa Matlab, el cual es un software utilizado mundialmente en ingeniería. Con este programa podemos tener una idea más clara de lo que ocurre en un trayecto dentro de una zona de cobertura de una estación radiobase.

En conclusión el objetivo de la presente tesis es “explicar el tratamiento y el proceso de las llamadas desde un equipo móvil hacía una estación base y viceversa, utilizando la herramienta Matlab¹, siendo la tecnología del sistema celular simulado el estándar IS-95, mejor conocido como CDMA”.

¹ Matlab es un programa utilizado para la solución de modelos matemáticos aplicados a la ingeniería, propiedad intelectual de The MathWorks, Inc.

CAPITULO 2.- HISTORIA A LOS SISTEMAS CELULARES

Desde que los servicios de telefonía móvil automática fueron introducidos por la década de los 70, han constituido uno de los segmentos que han experimentado un mayor y más rápido crecimiento dentro del sector de las telecomunicaciones, hasta el punto de que el teléfono móvil se ha convertido hoy en día en uno de los elementos más habituales de la vida diaria.

Este crecimiento ha sido posible en primer lugar, gracias a los acuerdos en materia de estandarización llevados a cabo por organismos intergubernamentales como la ITU (*International Telecommunications Union*) o la ETSI (*European Telecommunication Standards Institute*) posibilitando la existencia de economías de escala en el ámbito de un mercado común, lo que resulta en una reducción del precio de los terminales y la consiguiente extensión del mercado a un mayor número de clientes potenciales. En segundo lugar, debido a la propia evolución tecnológica, que ha permitido mejorar las prestaciones ofrecidas por los servicios ofertados no sólo desde el punto de vista del usuario final, reflejadas en una mayor velocidad de transmisión, una mejor calidad de recepción y una mayor confidencialidad de las comunicaciones, sino también desde la perspectiva de los operadores, en términos de una mayor capacidad y un uso más eficiente de los recursos radioeléctricos.

1. Comunicaciones Móviles de Primera Generación

La principal característica de los primeros sistemas de comunicaciones móviles es la utilización de modulaciones analógicas para la transmisión de la información. Si bien cuando existía entonces un cierto abanico de servicios diferenciados, tales como la radiomensajería o incluso las aplicaciones de transmisión de datos, era el servicio básico de voz, el principal objetivo de estos sistemas, aunque con diferentes modalidades según se tratara de telefonía pública, privada o simplemente del empleo de extensiones inalámbricas de la red fija. Algunos ejemplos de sistemas de primera generación se detallan a continuación:

a) Sistemas de telefonía pública

Destinados a permitir a un usuario generar o recibir llamadas de voz hacia cualquier otro usuario, ya sea de la red telefónica fija o móvil. El aspecto clave de estos sistemas para poder ofrecer un uso eficiente del espectro radioeléctrico sobre un elevado número de usuarios, es la división de la región de cobertura en un conjunto de celdas, cada una servida por una estación base, de modo que es posible reutilizar las mismas frecuencias en celdas ubicadas a una cierta distancia.

Dentro de estos sistemas destacan por ejemplo AMPS (American Mobile Phone System) en Estados Unidos; NMT (Nordic Mobile Telephone) desarrollado por Ericsson en Suecia; y empleado en varios países europeos, como por ejemplo España, TACS (Total Access Communications System), surgido en Europa como versión de AMPS y NTT (Nippon Telephone and Telecommunication), desarrollado en Japón. Todos estos sistemas eran de marcado ámbito nacional y no albergaban la posibilidad de interconectividad entre redes de diferentes países o roaming.

b) Sistemas de telefonía privada (sistemas troncales)

Tienen por finalidad brindar servicio de voz a grupos cerrados de usuarios, que no requieren del acceso a la red telefónica pública. Este tipo de sistemas acostumbran a ser operados por las compañías propietarias tras la adjudicación de unos determinados canales.

c) Sistemas de telefonía sin hilos (extensiones inalámbricas de la red fija)

Estos sistemas, concebidos esencialmente para aplicaciones domésticas, se basan en la conexión de un transmisor/receptor radio a la línea telefónica fija, lo que permite sustituir el terminal fijo por otro inalámbrico en una cierta área de cobertura reducida con una baja capacidad de movilidad. Si bien los primeros sistemas de estas características fueron introducidos sin ningún tipo de legislación, rápidamente surgieron algunos estándares como CT0 ó CT1 (Cordless Telephone).

d) Sistemas de radiomensajería

Permiten dirigir mensajes alfanuméricos de aviso de forma unidireccional hacia terminales móviles. Estaban basados en el protocolo POCSAG (Post Office Code Standards Advisory Group), que fue adoptado en España por Telefónica en 1989. Con objeto de permitir la operatividad internacional, surgieron algunos sistemas fruto de consorcios entre países como Eurosignal, entre Francia, Alemania y Suiza, en 1971; o Euromessage entre Francia, Alemania, Italia y Gran Bretaña, en 1989.

e) Sistemas de comunicaciones móviles de datos

Si bien los sistemas celulares o los sistemas troncales ofrecían una cierta capacidad de transmisión de datos, también existían en Europa sistemas propietarios con esta funcionalidad específica. Entre ellos destacan el sistema Mobitex de Ericsson o el Ardis de Motorola.

2. Comunicaciones Móviles de Segunda Generación

Con la irrupción de la tecnología digital en el ámbito de las comunicaciones móviles surgieron los sistemas denominados de segunda generación que permitían mejorar las prestaciones ofrecidas por los de primera generación aprovechando las características de dicha tecnología. Como ventajas principales se distinguen:

- La capacidad para incrementar la calidad de recepción gracias a la posibilidad de incorporar técnicas de ecualización y códigos correctores de errores.
- La mayor privacidad en las comunicaciones fruto del empleo de técnicas de criptografía sobre las secuencias de bits transmitidas.
- La posibilidad de emplear nuevas técnicas de acceso múltiple como las basadas en división en tiempo TDMA o en código CDMA, que permiten mejorar la eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico.
- La mayor capacidad para la transmisión de datos con diferentes velocidades binarias.

Entre los sistemas de segunda generación destacan los enumerados a continuación.

- a) Sistemas de telefonía pública.- En la línea de los sistemas NMT o TACS, en 1982 se planteó el desarrollo de un sistema que fuera un estándar a nivel europeo y que proporcionara la capacidad de interconexión entre redes de diferentes países. De este modo, surgió el denominado GSM (Global System for Mobile communications), trabajando en la banda de 900 MHz, con una técnica de acceso híbrida TDMA/FDMA, y que gracias a su rápido desarrollo ha logrado imponerse no sólo en Europa sino también en otros países como los del sudeste asiático, Australia, los países árabes o Sudamérica. Esto constituye uno de los grandes logros de GSM que le ha permitido imponerse a otros sistemas como los desarrollados en Japón (sistema JDC, Japanese Digital Celular) o en Estados Unidos (sistemas IS-54, Interim Standard 54, o D-AMPS, Digital AMPS, como evolución de AMPS, e IS-95, que incorpora como aspecto diferencial la tecnología basada en el acceso múltiple por división en código CDMA). Al margen del servicio básico de voz, este tipo de sistemas presentan capacidades para la transmisión de datos, aunque únicamente en modo circuito y con velocidades reducidas, lo que no los hace especialmente apropiados en un entorno de tráfico variable como el que típicamente se encuentra en aplicaciones de datos como la conexión a Internet.

A modo de ejemplo, GSM es capaz de soportar una velocidad de transmisión únicamente de hasta 9.6 kb/s, tras la incorporación de códigos correctores de errores para adaptarse a los requerimientos más elevados en cuanto a probabilidad de error de los sistemas de transmisión de datos. Fruto de la evolución de GSM para ofrecer una mayor capacidad y nuevos servicios diferenciados, han surgido las denominadas GSM fase + y GSM fase ++, así como la extensión a la banda de los 1800 MHz, denominada DCS-1800 (Digital Celular System–1800 MHz).

- b) Sistemas de telefonía privada: La evolución de los sistemas troncales hacia la tecnología digital se ha reflejado en el desarrollo del estándar

TETRA (Trans European Trunked Radio), a finales de 1995, de concepción similar a GSM pero con funcionalidades específicas para los grupos cerrados de usuarios. Al igual que GSM, incorpora también facilidades para la transmisión de datos, pudiéndose llegar hasta una velocidad máxima de 28.8 kb/s.

- c) Sistemas sin hilos: La segunda generación de las extensiones inalámbricas de la red fija se ha plasmado en la especificación, por parte de ETSI, del estándar DECT (Digital European Cordless Telecommunications renombrado luego, para poner de manifiesto que su ámbito no estaba restringido a Europa, como Digital Enhanced Cordless Telecommunication). DECT va más allá de las simples extensiones que suponían los sistemas de primera generación CT0 y CT1, convirtiéndose en un sistema celular con conexión a la red fija, aunque ofreciendo una reducida movilidad en comparación con un sistema como GSM. DECT emplea como técnica de acceso, al igual que GSM, un híbrido FDMA/TDMA, y tiene como peculiaridad frente a otros sistemas el uso de una técnica de duplexado por división en tiempo TDD. Es capaz de ofrecer tanto servicios de voz como de datos, alcanzando velocidades de hasta 64 kb/s, superiores a las de GSM, aunque todavía en modo circuito. En Japón, el sistema que se ha desarrollado en este ámbito ha sido PHS (Personal Handyphone System), implantado con gran éxito, mientras que en Estados Unidos se ha desarrollado el estándar PACS (Personal Access Communication Services).
- d) Sistemas de radiomensajería: La evolución de este tipo de sistemas hacia la segunda generación ha dado lugar al estándar ERMES (European Radio Message System), de mayor capacidad que POCSAG y con cobertura internacional. Respecto de este tipo de sistemas, es de destacar también el servicio que GSM ofrece para el envío y recepción de mensajes cortos unidireccionales, denominado SMS (Short Message Service).

3. Comunicaciones Móviles de Tercera Generación

La actual irrupción de los denominados sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación, surge principalmente debido a las siguientes motivaciones:

- a) En primer lugar, fruto del espectacular incremento del grado de penetración que han venido presentando los sistemas de comunicaciones celulares de segunda generación, superando ya en ciertos países al de los sistemas fijos. En relación a este aspecto, téngase en cuenta que si bien un teléfono fijo tiene un ámbito de uso familiar, el teléfono móvil presenta un uso unipersonal, lo que le permitirá un grado de penetración superior. Este crecimiento tenderá a llevar a la saturación los actuales sistemas de segunda generación, por lo que se hace necesaria la búsqueda de nuevas bandas de frecuencias y de nuevos sistemas que permitan hacer frente a la demanda con un uso de los recursos más eficiente.
- b) No hay que olvidar que, paralelamente a la evolución de las comunicaciones móviles, otro de los segmentos del sector de las telecomunicaciones que en la última década está experimentando un mayor grado de crecimiento es el del acceso a Internet. A la vista del crecimiento del acceso a Internet y de la evolución del mercado de las comunicaciones móviles es de esperar que la combinación de ambos en un acceso a Internet desde redes móviles pueda suponer un enorme mercado potencial de cara a los próximos años.

Si bien los sistemas celulares de segunda generación como GSM son capaces de ofrecer acceso a Internet, lo hacen en modo circuito, lo que presenta enormes limitaciones no sólo en términos de la velocidad de transmisión empleada sino también, de la eficiencia en el uso de los recursos, pues este tipo de aplicaciones se caracterizan por generar la información a ráfagas con lo que durante buena parte del tiempo el circuito no es utilizado. Estas limitaciones redundan por un lado en una reducida capacidad para ofrecer este tipo de servicios, y por el otro en un

precio de conexión para los usuarios mucho más elevado del que se puede llegar a ofrecer en una red fija.

En consecuencia, es deseable el diseño de nuevos sistemas que sean capaces de hacer frente a estas limitaciones con un uso más efectivo de los recursos y de adaptarse a las nuevas características del tráfico mediante técnicas de transmisión orientadas a paquetes, constituyendo éste uno de los retos al que los sistemas de tercera generación deberán hacer frente.

- c) También hay que tener presente la creciente demanda en servicios multimedia de alta velocidad, tales como vídeo, audio, videoconferencia, juegos interactivos, acceso a bases de datos, transferencia de ficheros, que se ha venido experimentando en los últimos años, en parte motivada por las mayores facilidades del acceso a Internet a través de las redes fijas de banda ancha. La integración de todos estos servicios dentro del marco de una red móvil, a la vez que suponer un mercado de enorme atractivo para compañías operadoras y proveedores de servicio, plantea también una serie de retos en los sistemas de tercera generación, pues se deben gestionar los escasos recursos radioeléctricos adecuadamente para poder ofrecer dichos servicios bajo unos parámetros de calidad de servicio (retardo, velocidad de transmisión, etc.) similares a los de la red fija pero haciendo frente a las peculiaridades de la transmisión por radio en entornos móviles.
- d) Finalmente, reseñar también el interés en lograr un sistema de comunicaciones móviles verdaderamente global que permita una movilidad universal con operación entre redes pertenecientes a países diferentes, llegando incluso a reunir bajo un sistema común las tres zonas geográficas de mayor influencia que son Europa, Estados Unidos y Japón.

El ámbito de actuación de los sistemas de tercera generación se pretende mostrar gráficamente en la Figura 2. 1 como una forma de englobar bajo un único sistema los diferentes entornos existentes, en función de la

cobertura ofrecida, desde los sistemas vía satélite hasta los más reducidos entornos de interiores, con objeto de permitir una movilidad universal de terminales capaces de soportar aplicaciones personalizadas de muy variada naturaleza. En el marco de la ITU las redes de comunicaciones móviles de tercera generación se engloban en el denominado IMT-2000 (International Mobile Telecommunication), antiguamente FPLMTS (Future Public Land Mobile Telecommunication System), siendo UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) el planteamiento europeo desarrollado por ETSI dentro de IMT-2000 y el CDMA 2000 el planteamiento Norteamericano.

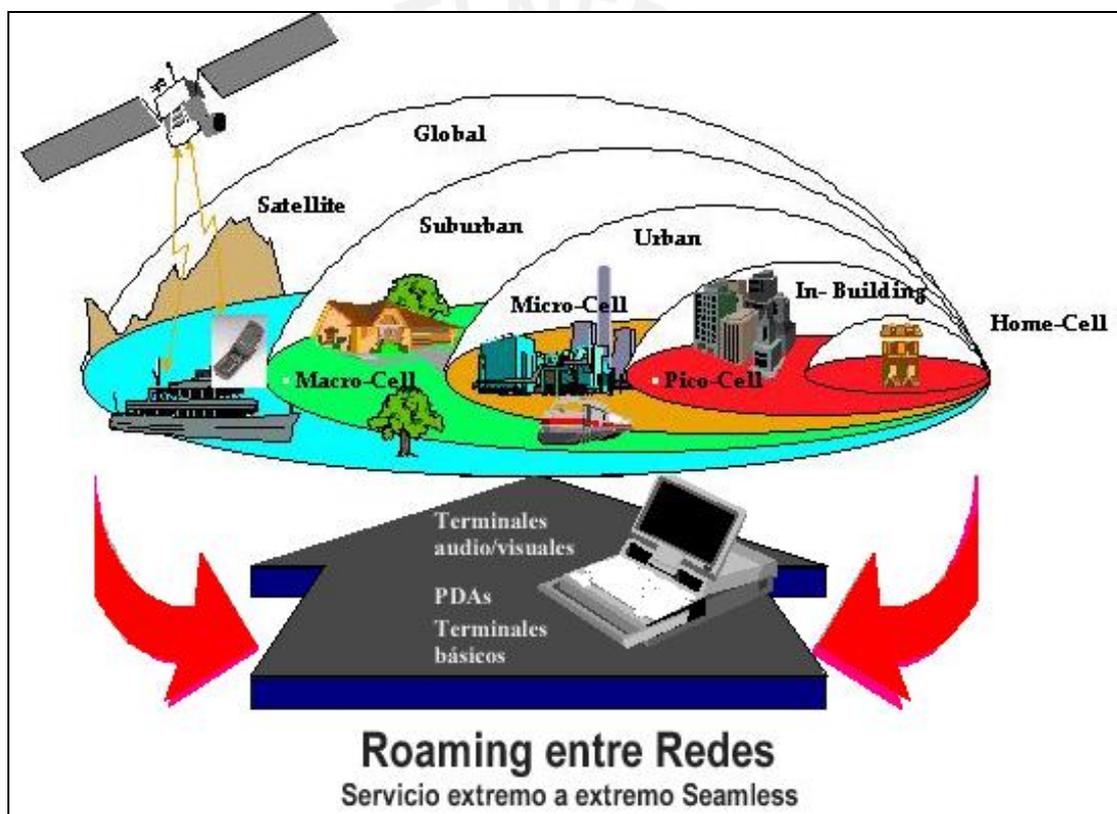


Figura 2. 1 - Servicio extremo a extremo Seamless

CAPITULO 3.- ACCESOS MÚLTIPLES

Vamos a ver varias formas de acceso a la interfaz de radio. Si el número de canales disponibles para todos los usuarios de un sistema de radio es menor que el número de posibles usuarios, entonces a ese sistema se le llama *sistema de radio truncado*. El *truncamiento* es el proceso por el cual los usuarios participan de un determinado número de canales de forma ordenada. Los canales compartidos funcionan debido a que podemos estar seguros que la probabilidad de que todo el mundo quiera un canal al mismo tiempo es muy baja. Un sistema de telefonía celular como CDMA es un sistema de radio truncado, porque hay menos canales que abonados que posiblemente quieran usar el sistema al mismo tiempo. El acceso se garantiza dividiendo el sistema en uno o más de sus dominios: frecuencia, tiempo, espacio o codificación.

1. Acceso Múltiple por División en Frecuencia (FDMA)

FDMA ("Frequency Division Multiple Access") es la manera más común de acceso truncado. Con FDMA, se asigna a los usuarios un canal de un conjunto limitado de canales ordenados en el dominio de la frecuencia. Los canales de frecuencia son muy preciados, y son asignados a los sistemas por los cuerpos reguladores de los gobiernos de acuerdo con las necesidades comunes de la sociedad. Cuando hay más usuarios que el suministro de canales de frecuencia puede soportar, se bloquea el acceso de los usuarios al sistema. Cuantas más frecuencias se disponen, hay más usuarios, y esto significa que tiene que pasar más señalización a través del canal de control. Los sistemas muy grandes FDMA frecuentemente tienen más de un canal de control para manejar todas las tareas de control de acceso. Una característica importante de los sistemas FDMA es que una vez que se asigna una frecuencia a un usuario, ésta es usada exclusivamente por ese usuario hasta que éste no necesite el recurso.

2. Acceso Múltiple por División del Espacio (SDMA)

SDMA ("Space Division Multiple Access") se usa en todos los sistemas celulares, analógicos o digitales. Por tanto, los sistemas celulares se

diferencian de otros sistemas de radio truncados solamente porque emplean SDMA. Los sistemas de radio celulares permiten el acceso a un canal de radio, siendo éste reutilizado en otras celdas dentro del sistema. Como vimos, el factor que limita SDMA es el factor de reutilización de frecuencia.

3. Acceso Múltiple por Salto de Frecuencia (FHMA)

FHMA es un sistema de acceso múltiple digital, en el cual, las frecuencias de las portadoras de los usuarios individuales se varían de forma pseudoaleatoria dentro de un canal de banda ancha. Los datos digitales se dividen en ráfagas de tamaño uniforme que se transmiten sobre diferentes portadoras.

4. Acceso Múltiple por División en Tiempo (TDMA)

TDMA ("Time Division Multiple Access") es común en los sistemas de telefonía fija. Las últimas tecnologías en los sistemas de radio son la codificación de la voz y la compresión de datos, que eliminan redundancia y periodos de silencio y disminuyen el tiempo necesario en representar un periodo de voz. Los usuarios acceden a un canal de acuerdo con un esquema temporal. Aunque no hay ningún requerimiento técnico para ello, los sistemas celulares, que emplean técnicas TDMA, siempre usan TDMA sobre una estructura FDMA. Un sistema puro TDMA tendría sólo una frecuencia de operación, y no sería un sistema útil. TDMA es un concepto bastante antiguo en los sistemas de radio. En los sistemas modernos celulares y digitales, TDMA implica el uso de técnicas de compresión de voz digitales, que permite a múltiples usuarios compartir un canal común utilizando un orden temporal. La codificación de voz moderna, reduce mucho el tiempo que se lleva en transmitir mensajes de voz, eliminando la mayoría de la redundancia y periodos de silencio en las comunicaciones de voz. Otros usuarios pueden compartir el mismo canal durante los periodos en que éste no se utiliza. Los usuarios comparten un canal físico en un sistema TDMA, donde han sido asignados en unos slots de tiempo. A todos los usuarios que comparten la misma frecuencia se les asigna un slot de tiempo, que se repite dentro de un grupo de slots que se llama trama.

Logrando múltiple circuitos de voz por cada 30 KHz. de ancho de banda en el sistema TDMA operando a full rate

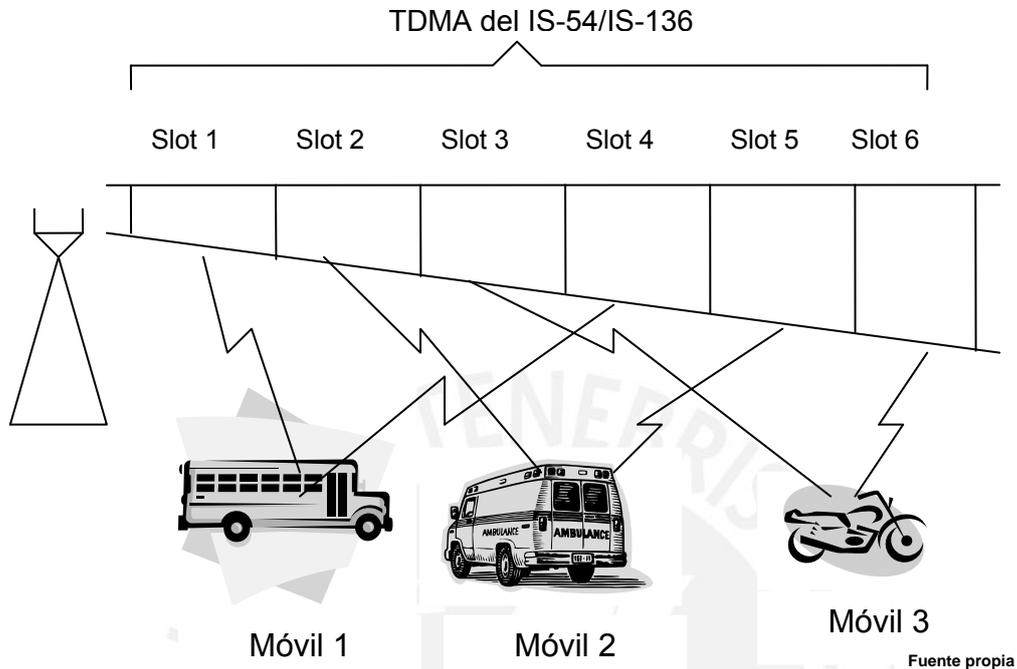


Figura 3. 1 – Acceso múltiple por división de tiempo

5. Acceso Múltiple por División de código(CDMA)

CDMA ("Code Division Multiple Access") pone a todos los usuarios que desean acceder a un recurso truncado en el mismo canal de radio frecuencia al mismo tiempo. La Figura 3. 2 muestra cómo se pueden generar dos canales CDMA sencillos.

Queremos transmitir ambas cadenas de datos juntas sobre un canal y separarlas en el receptor, por lo que le hemos de dar a cada una un canal virtual, para lo cual hacemos lo siguiente:

Los valores de voltaje son V para el "1" lógico y $-V$ para el "0" lógico.

En el lado de transmisión, los conjuntos de información binaria que son el Dato A y el Dato B (Figura 3. 2) se les asigna las *claves* A y B

respectivamente, luego a cada bit de información de A ó B se le realiza la función OREX con su respectiva clave (la cantidad de bits obtenida es el producto de los bits del dato multiplicado por la cantidad de bits de la clave), obteniéndose las señales A y B, las cuales se suman y se transmiten por el medio radio.

En el receptor (correlador) recibimos una composición de las dos señales A y B llamada "Mezcla A+B", la forma de onda es simplemente la suma algebraica, bit a bit, de las señales A y B. Para recuperar la información del Dato A de la señal compuesta se realiza lo siguiente. Se aplica la función OREX de la señal "Mezcla A+B" con la clave A, obteniéndose la señal llamada $(A+B) * \text{clave A}$, luego se integra bit a bit (considerando como periodo la longitud en bits de la clave A). Los signos de cada periodo de integración recuperan los bits del Dato A, con la señal B se operaría de la misma forma y se usaría su clave correspondiente.



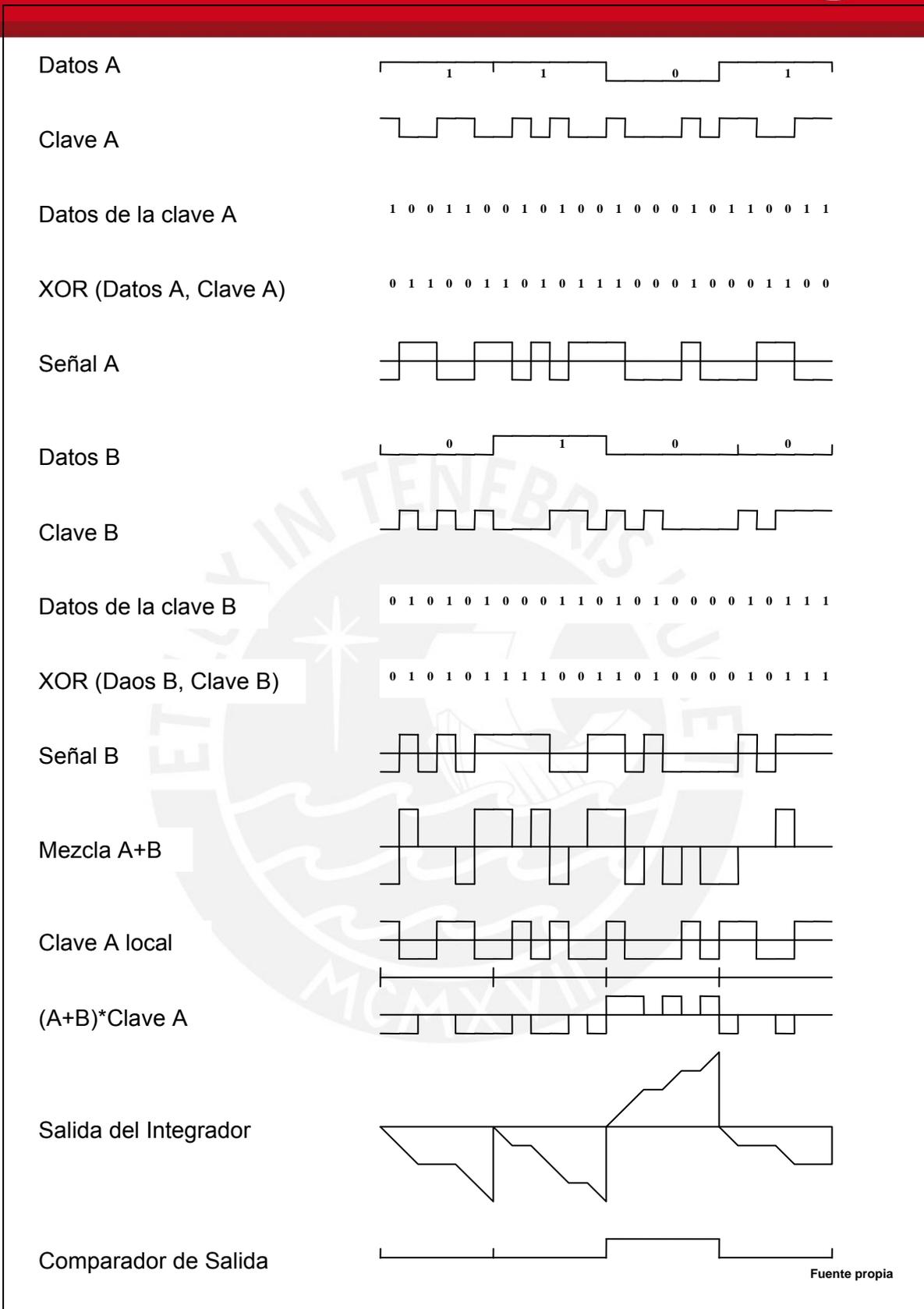


Figura 3. 2 – Acceso múltiple por división de código

6. Operaciones Dúplex

Excepto en situaciones especiales, la información vía radio se mueve en modo dúplex, que significa que para cada transmisión en una dirección, se espera una respuesta, y entonces se responde en la otra dirección. Hay dos formas principales de establecer canales de comunicaciones dúplex.

6.1 Dúplex por División de Frecuencia (FDD)

Debido a que es difícil y muy caro construir un sistema de radio que pueda transmitir y recibir señales al mismo tiempo y por la misma frecuencia, es común definir un canal de usuario con dos frecuencias de operación separadas, una para el transmisor y otra para el receptor. Todo lo que se necesita es añadir filtros en los caminos del transmisor y del receptor que mantengan la energía del transmisor fuera de la entrada del receptor. Se podría usar una antena común como un sistema de filtrado simple. Los sistemas de filtrado se llaman *duplexores* y nos permiten usar el canal (par de frecuencias) en el modo full-duplex; es decir, el usuario puede hablar y escuchar al mismo tiempo.

6.2 Dúplex por División de Tiempo (TDD)

Muchos sistemas de radio móviles, no requieren la operación full-dúplex. En estos sistemas se puede transmitir y recibir en la misma frecuencia pero no simultáneamente. Esta clase de dúplex se llama half-dúplex, y es necesario que un usuario de una indicación de que ha terminado de hablar, y está preparado para recibir respuesta de otro usuario.

CAPITULO 4.- RADIO PROPAGACIÓN

1 El espectro y la onda de espacio

Todo lo que existe en la naturaleza radia energía, en todas las direcciones. La radiación de energía, a diferencia de la conducción o la convección, no necesita de ningún "medio" para transferir energía. Vale de ejemplo lo que ocurre entre el Sol y la Tierra, la energía radiactiva viaja por el vacío del espacio, mientras que la convección transporta calor solo a través de cuerpos o a través de fluidos como lo son la atmósfera o los océanos.

La intensidad de la energía solar depende básicamente de su temperatura en una relación directa. Usamos el término "Longitud de Onda" para definir esta energía radiada (o radiación) porque sabemos que la forma en la que la energía viaja por el espacio o a través de cuerpos y fluidos se asemeja a una onda sinusoidal. Por cierto, la energía asume infinidad de longitudes de onda que depende de sus características particulares y peculiares. Desde muy pequeñas distancias entre cresta y cresta, cuando la longitud de onda es medida en magnitudes del orden de millonésimas de milímetros (rayos cósmicos), a millonésimas de metros (la luz que captan nuestros ojos), a valores más familiares como la frecuencia de un teléfono celular o de las estaciones de radio AM y FM.

El propósito de un sistema de comunicaciones electrónicas es comunicar información entre dos o mas ubicaciones (generalmente llamadas estaciones). Esto se logra convirtiendo la información de la fuente original a energía electromagnética y después transmitiendo la energía a uno o más destinos, en donde se convierte de nuevo a su forma original. La energía electromagnética puede propagarse en varios modos: como un voltaje o una corriente a través de un cable metálico, como ondas de radio emitidas por el espacio libre o como ondas de luz por una fibra óptica.

Las ondas electromagnéticas ocurren como consecuencia de dos efectos:

- Un campo magnético variable genera un campo eléctrico.
- Un campo eléctrico variable produce un campo magnético.

Las fuentes de radiación electromagnética son cargas eléctricas aceleradas, es decir que cambian con el tiempo su velocidad de movimiento.

Las ondas radiadas consisten en campos eléctricos y magnéticos oscilatorios que están en ángulo recto (perpendiculares) entre sí y también son perpendiculares

(ángulo recto) a la dirección de propagación de la onda, esto significa que las ondas electromagnéticas son por naturaleza transversales.

Ahora bien ¿qué son esos campos que mencionamos?. Los físicos crearon un concepto para explicar la acción o influencia que se puede ejercer a distancia sobre alguna partícula de referencia, sin que exista contacto real. Por ejemplo todos sabemos que cualquier cuerpo que esté en el aire sufre una atracción hacia la tierra que lo hace caer si no está sujeto a algo, ¿por qué cae? Decimos que por la acción de una fuerza. Esa fuerza la produce algo externo al cuerpo en cuestión, se dice entonces que en el punto o posición o lugar en el espacio donde el cuerpo se encuentra, existe un campo gravitatorio y a este se lo define como la relación entre la fuerza que se ejerce sobre una partícula de referencia y su masa. $G = F/m$

De la misma forma se dice que una partícula de referencia (en este caso es una partícula que tiene una carga eléctrica "q") se encuentra influenciada por un campo eléctrico cuando sobre ella se ejerce una fuerza; el campo eléctrico está dado como en el caso anterior por la relación entre la fuerza que dicha carga de referencia experimenta y el valor de la carga, $E = F/q$. Este campo, como en el caso anterior, también está originado externamente a la carga de referencia. Siguiendo con una explicación análoga, un campo magnético en un punto del espacio, es una zona donde una partícula de referencia, en este caso una carga "q" que se mueve a una cierta velocidad "v" experimenta sobre ella una fuerza, tal que, el campo magnético quedara definido así: $B = F / q.v$

Vemos entonces que en todos los casos un campo, es algo que existe por definición para explicar la fuerza que actúa sobre una partícula de referencia cuando está situada en un punto del espacio. En todos los casos, la intensidad del campo disminuye a medida que aumenta la distancia entre la partícula de referencia y la fuente que origina el campo.

Un físico de renombre James Clerk Maxwell demostró que las amplitudes de los campos eléctricos y magnéticos de una onda electromagnética están relacionadas. Las ondas electromagnéticas cubren un amplio espectro de frecuencias. Dado que todas las ondas electromagnéticas tienen igual velocidad c (velocidad de la luz) que es una constante es decir no cambia, la relación $c = f \times \lambda$ define todo el espectro posible, abarcando desde las ondas de radio de baja frecuencia y gran longitud de onda, las cuales son ondas electromagnéticas producidas por cargas que oscilan en una antena transmisora, las ondas de luz con frecuencias mayores (cada color de la luz blanca corresponde a una longitud de onda determinada) se producen

cuando determinados electrones oscilan dentro de los sistemas atómicos. Las ondas electromagnéticas fuera del campo visible como las ultravioletas, los rayos x, los rayos γ , rayos cósmicos, que son vibraciones de otros electrones, o desaceleraciones de los mismos.

Veamos cada una las diferentes ondas en orden decreciente de su longitud de onda y por lo tanto, orden creciente de su frecuencia, y como se producen:

- Ondas de radio, son el resultado de la aceleración de cargas a través de alambres conductores. Son generados por dispositivos electrónicos.
- Microondas que son ondas de radio de longitud corta también generadas por dispositivos electrónicos, se utilizan en sistemas de radar y para hornos a microondas.
- Ondas infrarrojas llamadas también térmicas, llegan hasta la luz visible (el rojo del espectro), se producen por la vibración de los electrones de las capas superiores de ciertos elementos, estas ondas son absorbidas fácilmente por la mayoría de los materiales. La energía infrarroja que absorbe una sustancia aparece como calor, ya que la energía agita los átomos del cuerpo, e incrementa su movimiento de vibración o translación, lo cual da por resultado un aumento de la temperatura.
- Ondas visibles, son la parte del espectro electromagnético que puede percibir el ojo humano. La luz se produce por la disposición que guardan los electrones en los átomos y moléculas. Las diferentes longitudes de onda se clasifican en colores que varían desde el violeta el de menor longitud de onda hasta el rojo el de mayor longitud de onda (de 4 a 7×10^{-7}). La máxima percepción del ojo humano se produce en la longitud de onda del amarillo-verdoso.
- Ondas ultravioletas, que se producen por vibraciones de mayor frecuencia, producidas por ejemplo en el sol.
- Rayos X cuya fuente más común es la desaceleración de electrones que viajan a altas velocidades (alta energía) al chocar en un bombardeo de un blanco metálico.

Algunas consideraciones:

- En el Perú su administración está asignada al MTC.
- Uso del espectro en el Perú: "Plan Nacional de Atribución de Frecuencias".
- En todos los países el espectro está dividido en bandas que van desde 10 KHz hasta 300 GHz.

- Sistemas Celulares: UHF (300 – 3000 MHz).
- Modo de propagación en estas bandas: onda de espacio.

2 Definiciones útiles

- Antena Isotrópica: Antena hipotética cuyas propiedades de emisión y recepción son iguales en todas direcciones; en otras palabras, su patrón de radiación es esférico.
- Potencia: Siempre que se haga referencia a la potencia de un transmisor radioeléctrico, esta se expresará, según la clase de emisión, en una de las formas siguientes:
 - Potencia en la cresta de la envolvente.
 - Potencia media.
 - Potencia de la portadora.
- Potencia en la cresta de la envolvente: La media de la potencia suministrada a la línea de alimentación de la antena por un transmisor en condiciones normales de funcionamiento, durante un ciclo de radiofrecuencia, tomado en la cresta más elevada de la envolvente de la modulación.
- Potencia media: La media de la potencia suministrada a la línea de alimentación de la antena por un transmisor en condiciones normales, evaluada durante un intervalo de tiempo suficientemente largo comparado con el periodo correspondiente a la frecuencia más baja que existe realmente como componente en la modulación.
- Potencia de la portadora: La media de la potencia suministrada a la línea de alimentación de la antena por un transmisor durante un ciclo de radiofrecuencia en ausencia de modulación.
- Ganancia de antena: Es la relación de la intensidad de radiación en una dirección dada de una antena cualquiera con respecto a la de una antena isotrópica, alimentadas ambas antenas con la misma potencia de entrada. Salvo que se indique otra cosa, la cifra dada para la ganancia de una antena designa la ganancia en la dirección de su haz principal.

- Antena dipolo: Antena constituida por dos partes simétricas conectadas por el punto medio de la antena a un aparato emisor o receptor. Tiene una ganancia relativa a la antena isotrópica de 2.14 dBi.

- Decibel o decibelio (dB): Unidad logarítmica empleada para expresar la razón o el valor relativo de dos magnitudes de igual naturaleza: dos potencias, dos tensiones, dos corrientes. Cuando se comparan dos potencias, el número de decibelios, n , viene dado por la fórmula: $n = 10 \log (P_2/P_1)$. El decibelio se utiliza también como unidad de potencia absoluta, adoptando un valor fijo de referencia. En estos casos se suele utilizar la siguiente nomenclatura: dB r , donde r indica el valor que se ha tomado como referencia. Así se tienen por ejemplo:

- dBm: $10 \log (P(\text{mW}))$, se toma como referencia 1 mW

- dBW: $10 \log (P(\text{W}))$, se toma como referencia 1 W

- Potencia Radiada Efectiva (ERP): La potencia suministrada a la antena por la estación base o transmisor, aumentada por la ganancia relativa de la antena en una dirección dada y disminuida por las pérdidas en el camino de Tx. Se utiliza en el cálculo del área de cobertura. Usualmente se hace referencia a la antena dipolo (dBd). Ejemplo:

- Potencia a la salida de la BTS:	44 dBm(25 W)
- Pérdidas en el combinador:	-1 dB
- Pérdida en la línea de Tx:	-3 dB
- Ganancia de la antena:	10 dBd
- ERP:	50 dBm(100 W)

- Patrón de Antena: Representación gráfica del patrón de antena: Vertical y Horizontal.

- Azimuth: Dirección en el plano horizontal indicada generalmente en grados a partir del norte y en el sentido de las agujas del reloj.

- Angulo de apertura de haz (beamwidth) : Angulo de apertura de un haz de ondas o de un haz electrónico, medido entre puntos de intensidad igual a determinada fracción (por lo general $\frac{1}{2}$) de la intensidad máxima. Refiriéndose a una antena direccional, ángulo entre los puntos a -3 dB respecto a la dirección de máxima radiación.

- Filtros: Sistema que tiene la función de no dejar pasar frecuencias no deseadas.

- Combinadores: Permite que varios canales utilicen una única antena de Tx
- Multiacoplador de Rx: Permite que varios canales utilicen una única antena de Rx
- Duplexores: Permite que los caminos de Tx y Rx utilicen una única antena
- Línea de Transmisión (feeder): Cable coaxial utilizado para conectar la antena con el equipo (radio base, estación base o repetidora).
- Torres: Ventada, Autosoportada, Polo o Monopolo.
- Ruido Radioeléctrico: Energía no confinada en una banda estrecha que se superpone con la señal interfiriéndola. Puede ser interno o externo.
- Fading: Desvanecimiento de la señal.
- Multitrayectoria: Es el fenómeno que se produce cuando una señal viaja por diferentes caminos, de tal manera que en el receptor se recibe varias versiones de la misma señal.
- Diversidad: Las señales llegan a la antena de recepción por múltiples caminos, por lo que estas señales son recibidas en diferentes fases. Esto implica que algunas señales se pueden sumar para formar una señal más robusta, mientras que otras se anulan causando que se debilite la señal. Cuando se implementa la diversidad de espacio, 2 antenas son instaladas en el receptor. Estas antenas son instaladas varias longitudes de onda aparte para asegurar mínima correlación entre los dos caminos de Rx. De esta manera las 2 señales son combinadas y la intensidad de señal mejorada.

3 Propagación en el espacio libre

Todo sistema de telecomunicación debe diseñarse para que en el receptor se obtenga una relación señal-ruido mínima que garantice su funcionamiento. Los servicios de radiocomunicaciones, radiodifusión, radiolocalización (radar), teledetección y radioayudas a la navegación tienen en común el empleo de ondas electromagnéticas radiadas como soporte de la transmisión de información entre el transmisor y el receptor.

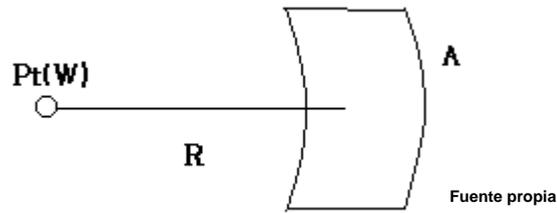


Figura 4. 1 – Potencia radiada en una superficie

Donde:

P_t : Potencia del transmisor isotrópico.

R : Distancia entre transmisor y receptor.

A : Área de la antena receptora.

Por lo tanto tenemos:

$$F^0 = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} (W / m^2) \quad (4.1)$$

Donde:

F^0 : Densidad de flujo.

G_t : Ganancia de la antena transmisora.

La potencia recibida por el receptor sería:

$$P_r = F^0 A_R \quad (4.2)$$

Donde:

P_r : Potencia recibida.

A_R : Área de la antena.

Aunque en la realidad, la antena tiene siempre una eficiencia entre 50% y 70%. Por consiguiente, corregimos la fórmula anterior con su respectiva eficiencia:

$$P_r = F^0 A_R \eta \quad (A_e = A_R \eta) \quad (4.3)$$

$$P_r = F A_e \quad A_e : \text{Área efectiva.} \quad (4.4)$$

Desarrollando con ayuda de la ecuación (4.1):

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} A_e \quad (4.5)$$

Algunas ecuaciones útiles:

$$A_e = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad G_r : \text{Ganancia de la antena receptora.} \quad (4.6)$$

$$\lambda = \frac{c}{f}; \quad c = 3 * 10^5 \text{ Km / s} \quad (4.7)$$

Reemplazando en la ecuación (4.5):

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \left[\frac{G_r \left[\frac{c}{f} \right]^2}{4\pi} \right]$$

$$P_r = P_t G_t G_r \left[\frac{(3 * 10^5)^2}{(4\pi)^2 R^2 f^2 (10^6)^2} \right] \quad R \text{ en kilómetros; } f \text{ en MHz.}$$

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{3}{4\pi} \right)^2 \left(\frac{1}{10^2} \right) \left(\frac{1}{R^2 f^2} \right)$$

$$P_r = P_t G_t G_r \left[\frac{0.57 * 10^{-3}}{(Rf)^2} \right] \quad (4.8^1)$$

$$\left(\frac{P_r}{P_t} \right)_{(dB)} = G_{t(dB)} + G_{r(dB)} - 32.5 - 20 \log(R) - 20 \log(f) \quad (4.9)$$

¹ La fórmula (4.8) es conocida como la ecuación de Friis

4. Atenuaciones en el medio ambiente

Pérdidas por vegetación:

Vegetación escasa	6 dB
Ligera (light)	10 dB
Regular	15 dB
Densa	20 dB
Muy densa	25 dB

Pérdidas por edificaciones:

Agua/Área abierta	0 dB
Rural	5 dB
Suburbana	8 dB
Urbana	22 dB
Densamente urbana	27 dB

Vehículo: 10-14 dB

Pérdidas por el cuerpo humano:

2 dB (antena en posición vertical)

6 dB (antena en posición horizontal)

5. Métodos para determinar el área de cobertura

5.1 Modelo de Okumura

El modelo de Okumura es uno de los más ampliamente utilizados para predicción de señales en áreas urbanas. Este modelo es aplicable para frecuencias en el rango de 150 MHz a los 1920 MHz (sin embargo típicamente es extrapolado para frecuencias arriba de 3000 MHz) y distancias de 1 Km. a 100 Km. Puede ser usado para alturas de la antena de la estación base en el rango de 30 m a 1000 m.

Okumura desarrollo un grupo de curvas que brindan el valor de la atenuación media relativa al espacio libre, además de basarse en parámetros pre-definidos. Los valores obtenidos de cada curva fueron obtenidos por exhaustivas mediciones usando antenas verticales y omni-direccionales tanto en la base como en el móvil y graficadas en función de la frecuencia:

- VHF: 200 MHz
- UHF: 453, 922, 1310, 1430 y 1920 MHz

Y como una función de la distancia. El modelo puede ser expresado como:

$$L_{50}(\text{dB}) = L_F + A_{\text{mu}}(f,d) - G(h_{\text{te}}) - G(h_{\text{re}}) - G_{\text{AREA}} \quad (4.10)$$

De donde:

L_{50} = Son las pérdidas por propagación en espacio libre (el subíndice 50 hace referencia al valor medio).

$G(h_{\text{te}})$ = Es el factor de la ganancia de la altura de la antena de la Estación Base.

$G(h_{\text{re}})$ = Es el factor de la ganancia de la altura de la antena del móvil.

G_{AREA} = Es la ganancia debido al tipo de ambiente.

Okumura encontró que $G(h_{\text{te}})$ varía a un índice de 20 dB/decada y $G(h_{\text{re}})$ varía a un índice de 10 dB/decada para alturas menores que 3 m.

$$G(h_{\text{te}}) = 20\log(h_{\text{te}}/200) \quad 1000 \text{ m} > h_{\text{te}} > 30 \text{ m} \quad (4.11)$$

$$G(h_{\text{re}}) = 10\log(h_{\text{re}}/3) \quad h_{\text{re}} < 3 \text{ m} \quad (4.12)$$

$$G(h_{\text{re}}) = 20\log(h_{\text{re}}/3) \quad 10 \text{ m} > h_{\text{re}} > 3 \text{ m} \quad (4.13)$$

El modelo de Okumura está totalmente basado en mediciones de datos y no provee de una explicación analítica. Su versatilidad lo ha vuelto un estándar para la planeación de sistemas de comunicación celular modernos en Japón, ya que se basa en análisis estadísticos para terrenos en áreas urbanas, suburbanas y abiertas de ese país. Utiliza factores de corrección

para terrenos irregulares: terreno montañoso, montaña aislada, grado de inclinación del terreno y trayecto mixto tierra-mar.

Clasificación de las áreas

Área abierta: Corresponde a un espacio abierto donde no hay obstáculos tales como árboles altos y edificios en el trayecto de propagación.

Área suburbana: Este es el caso de una villa o una carretera con casa y árboles en los alrededores, donde se presentan algunos obstáculos cerca del móvil, pero sin mostrar mayor congestión.

Área urbana: Corresponde a una ciudad grande o a un pueblo de gran población con grandes edificios y casas de dos o más pisos.

La más grande desventaja de este, es su lenta respuesta a los cambios rápidos en el terreno.

5.2 Modelo Hata

Este modelo es una formulación empírica de los datos de las pérdidas de propagación provistos por Okumura, y es válido de los 150 MHz a los 1500 MHz.

Las pérdidas dentro de un área **urbana** como una fórmula estándar:

$$L_{50}(\text{urbano})(\text{dB})=69.55+26.16 \log(f_c)-13.82 \log(h_{te})-a(h_{re})+(44.9-6.55 \log(h_{te}))\log(d) \quad (4.14)$$

Tomando en cuenta que:

$$150 \text{ MHz} < f_c < 1500 \text{ MHz} \quad (4.15)$$

$$30 \text{ m} < h_{te} < 200 \text{ m} \quad (4.16)$$

$$1 \text{ m} < h_{re} < 10 \text{ m} \quad (4.17)$$

Involucra una nueva variable que es el factor de corrección de la antena del móvil y se define según el tamaño de la ciudad:

Para ciudades pequeñas y medianas:

$$a(h_{re}) = (1.1 \log f_c - 0.7)h_{re} - (1.56 \log f_c - 0.8) \text{ dB} \quad (4.18)$$

Para ciudades grandes:

$$a(h_{re}) = 8.29(\log 1.54h_{re})^2 - 1.1 \text{ dB} \quad \text{para } f_c < 300 \text{ MHz} \quad (4.19)$$

$$\text{y } a(h_{re}) = 3.2(\log 11.75h_{re})^2 - 4.97 \text{ dB} \quad \text{para } f_c > 300 \text{ MHz} \quad (4.20)$$

Para utilizar la misma fórmula en un ambiente **suburbano** se utiliza como:

$$L_{50}(\text{dB}) = L_{50}(\text{urbano}) - 2[\log(f_c/28)]^2 - 5.4 \quad (4.21)$$

Para áreas **rurales**

$$L_{50}(\text{dB}) = L_{50}(\text{urbano}) - 4.78(\log f_c)^2 + 18.33 \log f_c - 40.94 \quad (4.22)$$

Este modelo se adapta muy bien para el diseño de sistemas de gran escala, pero no para sistemas PCS los cuales tienen células del orden de 1 Km. de radio.

5.3 Link budget (Presupuesto de link)

El link budget es importante, porque en conjunto con los modelos de propagación, se utiliza para predecir el área de cobertura de una estación base, que a su vez se utiliza para determinar el número de estaciones base que un sistema necesita por cobertura. Los métodos de propagación más usados con el link budget son los de Hata. El link budget no es sino un listado de todas las pérdidas y ganancias que hay entre la estación base y el móvil y viceversa.

El link budget me permite averiguar la pérdida máxima en el trayecto de propagación para una condición dada (generalmente es la sensibilidad del receptor).

Esta pérdida me permite 2 cosas:

- Averiguar si hay un desbalance entre los enlaces directo y reverso (balanced path)
- Determinar el radio de cobertura usando el método de propagación adecuado.

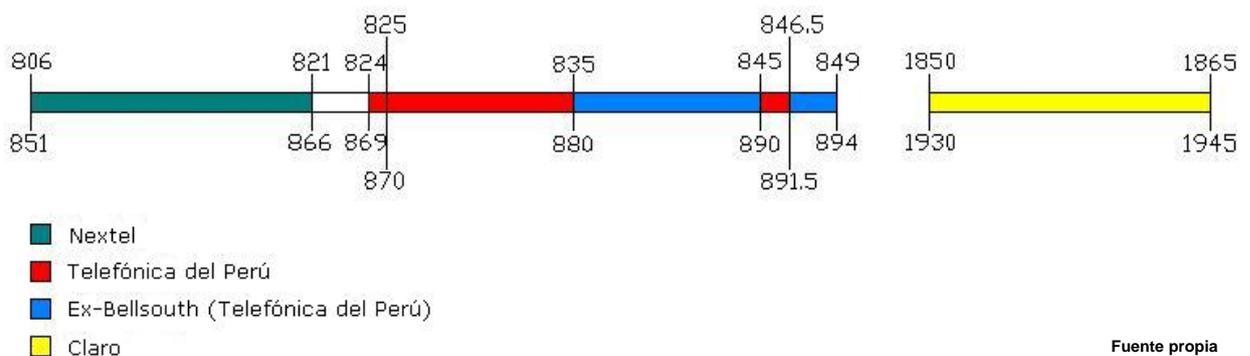
$$L_{\text{uplink}} = P_{\text{mob}} + G_{\text{mob}} - L_{\text{body}} - L_{\text{in building}} - \text{Fade Margin} + G_{\text{ant BTS}} - L_{\text{cables}} - \text{Sensib}_{\text{BTS}}. \quad (4.23)$$

$$L_{\text{downlink}} = P_{\text{BTS}} + G_{\text{ant BTS}} - L_{\text{cables}} - L_{\text{in building}} - \text{Fade Margin} + G_{\text{mob}} - L_{\text{body}} - \text{Sensib}_{\text{móvil}}. \tag{4.24}$$

6 Bandas de frecuencias asignadas en Perú

El espectro radioeléctrico, definido como la banda del espectro electromagnético comprendido entre 10 KHz y 300 GHz ha cobrado una enorme importancia en el mercado de las telecomunicaciones. En este sentido, se puede mencionar que en algunas Administraciones de la Unión Europea, adquieren mayor importancia las subastas por anchos de banda entre 10 y 15 MHz, por las que se han obtenido montos que superan los US\$ 30,000 millones. Las empresas operadoras que han adquirido la atribución de estas bandas, por un determinado lapso de tiempo, deben haber evaluado que es factible un negocio por medios inalámbricos, considerando que se está abonando estas sumas de dinero sólo por ingresar al mercado, independientemente de la inversión de los equipos, su instalación, operación y mantenimiento.

En el Perú, no hemos sido ajenos a la necesidad por acceder al mercado de los medios inalámbricos. En su oportunidad, se han creado nuevos servicios que permiten básicamente la movilidad del equipo terminal (aparato telefónico, equipos de datos, etc), mejora de las facilidades al usuario, acceso al usuario en cualquier punto donde este se encuentre y sobre todo mayor ancho de banda. Asimismo, cabe destacar que de acuerdo a la normatividad vigente, la autorización para el uso del espectro radioeléctrico puede ser a solicitud de parte o concurso público de ofertas. En la Figura 4. 2 se muestra un resumen de estos servicios vigentes en el Perú.



Fuente propia

Figura 4. 2 – Bandas de operadores telefónicos

CAPITULO 5.- ESTÁNDAR IS-95 CDMA

1. Principios básicos

CDMA es un término genérico que define una interfaz de aire inalámbrica basada en la tecnología de espectro extendido (spread spectrum). Para telefonía celular, CDMA es una técnica de acceso múltiple especificada por la TIA como IS-95. En marzo de 1992, la TIA estableció el subcomité TR 45.5 con la finalidad de desarrollar un estándar de telefonía celular digital con espectro extendido. En julio de 1993, la TIA aprobó el estándar CDMA IS-95.

Cada dispositivo que utiliza CDMA esta programado con un pseudocódigo, el cual se usa para extender una señal de baja potencia sobre un espectro de frecuencias amplio. La estación base utiliza el mismo código en forma invertida (los ceros son unos y los unos sin ceros) para reconstruir y recuperar la señal original. Los otros códigos permanecen extendidos, distinguibles del ruido de fondo.

Hoy en día existen muchas variantes, pero el CDMA original se conoce como cdmaOne bajo una marca registrada de Qualcomm. A CDMA se le caracteriza por su alta capacidad y celdas de radio pequeño, que emplea espectro extendido y un esquema de codificación especial y, lo mejor de todo es muy eficiente en potencia.

La transferencia de celdas (handoff) de CDMA, método para transferir llamadas entre celdas, reduce inteligentemente el riesgo de interrumpirlas durante una transferencia. El proceso conocido como transferencia suave o transparente (soft handoff) entre celdas conduce a pocas llamadas caídas, ya que dos o tres celdas siempre monitorean la llamada. La transferencia entre celdas es transparente a los usuarios debido a que como, estos utilizan el mismo espectro, es más fácil moverse de una celda a otra sin que el suscriptor lo advierta.

CDMA es una forma de acceso múltiple donde una serie de diferentes códigos son asignados a diferentes abonados usando la misma radio frecuencia. Las características más saltantes son:

- La banda es más grande que la señal de información
- Una serie de códigos -casi al azar- son asignados a los abonados
- Todos los abonados comparten el mismo espectro
- Los abonados se distinguen por sus propios códigos.
- La capacidad está limitada por la interferencia de los otros usuarios

2. Modelo del sistema

El sistema está conformado por estaciones móviles, estaciones bases, MTSO's (también llamado BSC's) este se interconecta con el PSTN a través del MSC(Mobile Switching Center). Algunos MTSO's están administrados por los OMC's(Operations Management Center). Una de las funciones críticas del MTSO es la coordinación de las frecuencias y tiempos, que con ayuda del GPS(Global Positionining System) logra realizarlo.

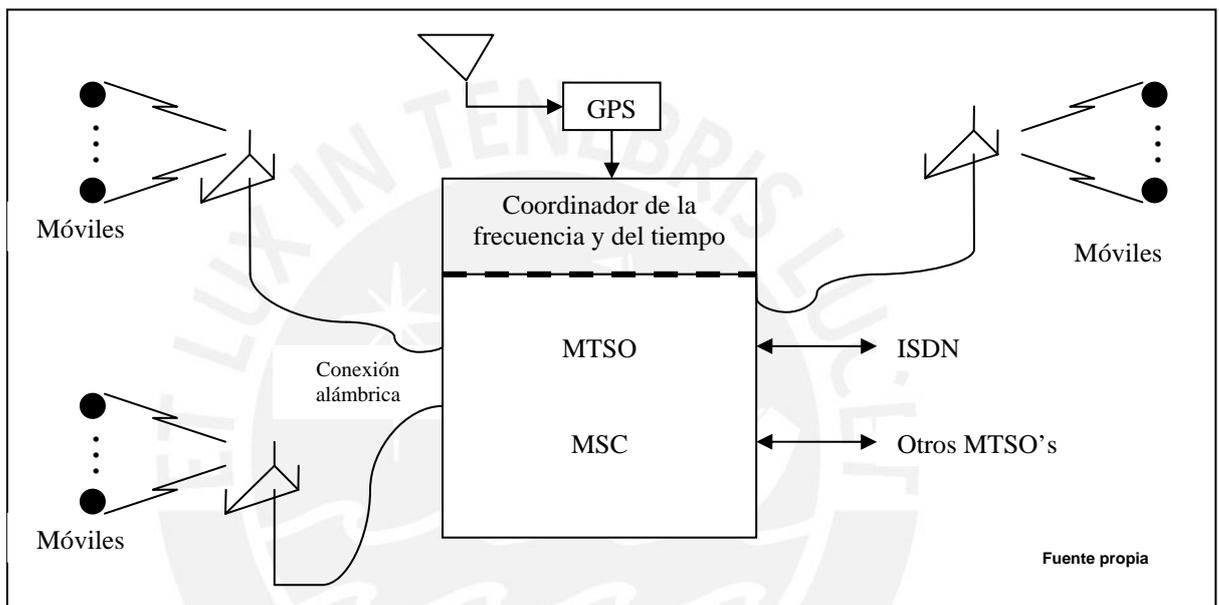


Figura 5. 1 – Sistema de interconexión

Frecuencias de funcionamiento

En un comienzo existió dos bandas de frecuencias la " A " y la " B " de 10 MHz cada una, después se extendieron a 12.5 MHz cada una con las bandas " A' ", " B' " y " A'' ".

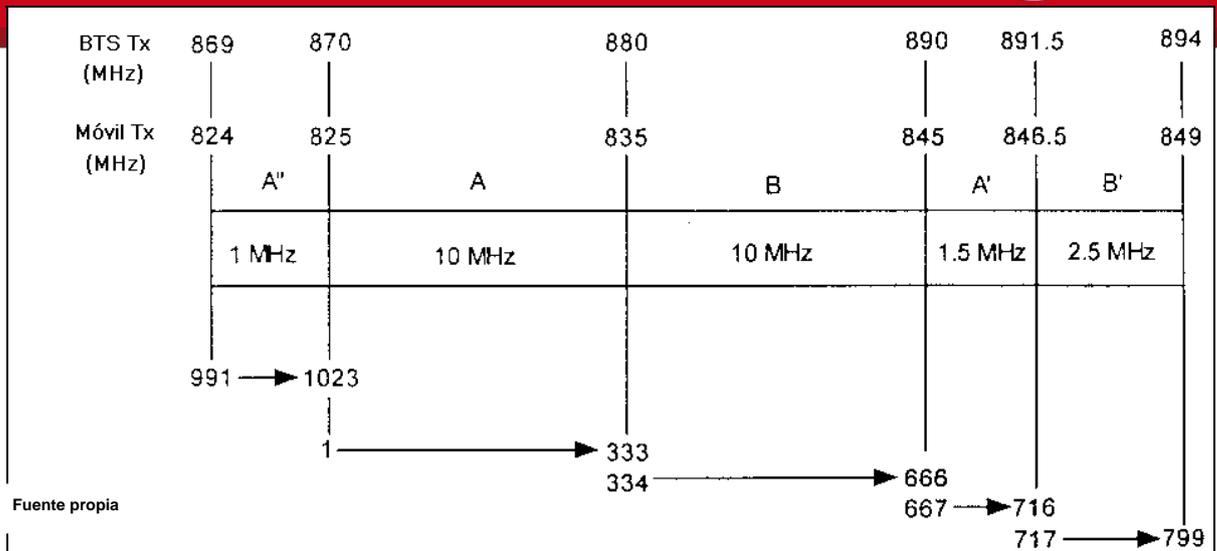


Figura 5. 2 – Bandas de frecuencias²

Para el caso AMPS Las frecuencias correspondientes para los canales del móvil ó del enlace inverso (Reverse Link) ó uplink son:

$$f_{móvil} = \begin{cases} 0.03N + 825MHz; & 1 \leq N \leq 799 \\ 0.03(N - 1023) + 825MHz; & 990 \leq N \leq 1023 \end{cases} \quad (5.1)$$

Las frecuencias correspondientes para la estación base ó el enlace directo (Forward Link) ó Download son:

$$f_{móvil} = \begin{cases} 0.03N + 870MHz; & 1 \leq N \leq 799 \\ 0.03(N - 1023) + 870MHz; & 990 \leq N \leq 1023 \end{cases} \quad (5.2)$$

Pueden existir varias portadoras, por eso que el teléfono tiene la prioridad de buscar primero la portadora CDMA primaria en el canal 283. En cada una de las bandas pueden haber 7 portadoras. La Figura 5. 3 muestra como al implementarse una portadora CDMA se debe sacrificar 41 canales AMPS de 30 KHz, además de 18 canales para formar bandas de guarda, utilizándose un total de 59 canales AMPS. En el canal 241 estaría la portadora CDMA secundaria.

² Apuntes de clase del curso de teoría de la comunicaciones 2

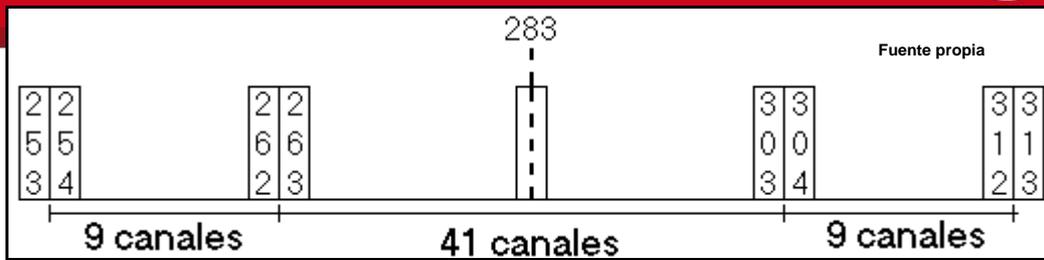


Figura 5.3 – Primera portadora

3. Códigos Ortogonales

Para transmitir dos ó más señales a una misma frecuencia se requiere que sean ortogonales. Por lo tanto se deben buscar códigos ortogonales entre sí, es decir, que si se aplica una correlación de dos códigos ortogonales cualesquiera el resultado debe ser nulo. Otra forma de decirlo es que la integral del producto de estos dos códigos ortogonales cualesquiera en el tiempo debe ser cero. Expresado matemáticamente:

$$\int_0^T W_{j(t)} W_{i(t)} dt = \begin{cases} 0, & \text{si } j \neq i \\ T, & \text{si } j = i \end{cases} \quad (5.3)$$

Preferentemente se busca que este grupo de códigos ortogonales sea el más grande posible, pero el máximo número de códigos ortogonales entre sí es el número de bits del código mencionado, sea cual fuera la combinación.

En el caso de IS-95, el código es de 64 bits, por lo tanto el número de códigos ortogonales entre sí es también 64.

Los Códigos Walsh son códigos ortogonales entre sí descubiertos en 1923 por J. L. Walsh.

Los valores de estos códigos son +1 y -1, que representan el '0' y el '1' lógico respectivamente.

El código Walsh enésimo en número binario se puede encontrar siguiendo estos pasos:

1. El número 'n' referente al enésimo código Walsh es convertido en número binario.
2. Se coloca un cero. El código Walsh siempre comienza con un cero.
3. Si el bit más significativo del número binario 'n', escrito siempre con 6 espacios binarios, es cero; entonces se coloca a continuación del primer cero

del código Walsh, otro cero. Por lo tanto tendríamos como nuevo código Walsh hallado hasta ahora '00'. Pero si el bit más significativo del número binario 'n', escrito siempre en 6 espacios binarios, es uno; entonces se coloca a continuación del primer cero del código Walsh, un uno. De esta manera obtendríamos como nuevo código Walsh hallado hasta ahora '01'.

4. Se verifica el siguiente bit del número binario 'n', escrito siempre con 6 espacios binarios. Si el bit es cero; entonces se colocan a continuación del código Walsh encontrado hasta el momento, los bits invertidos de este código mismo. Se refiere invertidos a escribir el número desde el bit menos significativo hasta el más significativo. Pero si el bit es '1'; entonces se colocan a continuación del código Walsh hallado hasta el momento; los bits invertidos negados de este mismo. Se refiere negado a escribir el '0' como '1' ,y el '1' como '0'.
5. Se repite el 4° paso hasta el último bit del número 'n'.

Por ejemplo hallaremos el código Walsh '13':

- 13 en número binario es: 001101

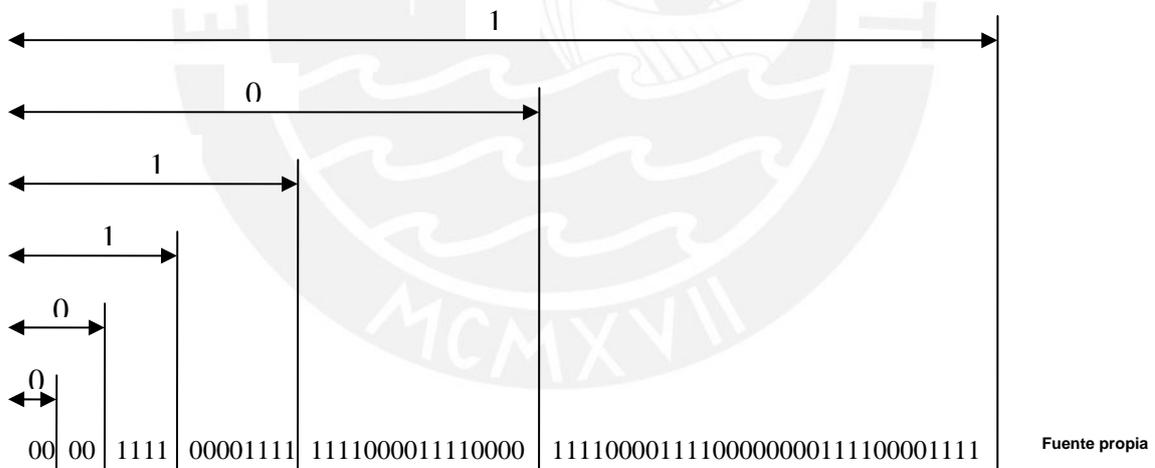


Figura 5. 4 Ejemplo de código Walsh

Los códigos Walsh y Hadamard son los mismos, pero en diferente orden (Anexo A). La matriz de Hadamard es cuadrada de +1's y -1's, que al igual que los códigos Walsh son representados por '0' y '1' respectivamente.

La matriz Hadamard de orden 2 es:

$$H_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.4}$$

En esta matriz se observa 2 códigos ortogonales de 2 bits.

Para una matriz de orden 4 se hace la siguiente operación:

$$H_4 = \begin{bmatrix} H_2 & H_2 \\ H_2 & \overline{H_2} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Donde $\overline{H_2}$ es el complemento de H_2 .

$$\overline{H_2} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

En la matriz de orden 4 contiene 4 códigos ortogonales entre sí.

Para una matriz de orden N sería:

$$H_N = \begin{bmatrix} H_{N/2} & H_{N/2} \\ H_{N/2} & \overline{H_{N/2}} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Donde $H_{N/2}$ es el complemento de $\overline{H_{N/2}}$

4. Secuencias Pseudoaleatorias (PN³)

Estas secuencias no son totalmente aleatorias, para que el receptor pueda recuperar la señal original transmitida. Estas mismas son generadas por un registro de desplazamiento linealmente realimentados, LFSR (Linear Feedback Shift Register), de esta manera la salida de este LFSR es una secuencia cíclica. En las etapas del LFSR aparecerán todas las combinaciones o estados menos la que corresponde a todos en ceros. Por lo tanto, si el número de etapas es 'n', entonces el número de estados es $2^n - 1$. Indiscutiblemente, nunca se podrá cargar el LFSR con el estado con ceros, porque la salida siempre sería ceros en cada pulso del reloj.

La realimentación viene definida por el polinomio de coeficientes binarios:

$$h(x) = h_0x^n + h_1x^{n-1} + h_2x^{n-2} + \dots + h_{n-1}x + h_n \quad (5.8)$$

³ PN deriva de la palabra pseudonoise en inglés. La interpretación en español es pseudoaleatoria.

de '0's y 2^{n-5} corridas son de '1's); así hasta al final donde existirá una corrida de '0's de $n-1$ bits y una corrida de '1's de n bits.

5. La correlación de la secuencia en bipolar con la misma secuencia en bipolar desplazada da como resultado -1 siempre.

Estas secuencias están estrechamente relacionadas con las máscaras, las cuales sirven para obtener el offset ó desplazamiento de la misma. Estas máscaras dependen del estado que esta cargado en el generador de secuencias.

La máscara es combinada con el estado cargado en el generador de secuencias para dar el desplazamiento deseado.

Con esta técnica se puede generar, varias secuencias desplazadas de la secuencia de referencia y por si fuera poco al mismo tiempo, debido al uso de varias máscaras. Esta peculiaridad ayuda a recibir varias señales a la vez (Receptor Rake), para tener una mejor calidad del sistema, ya sea en el enlace directo (Forward Link) como en el enlace inverso (Reverse Link).

Es fundamental que todas las estaciones bases estén sincronizadas, por lo que verifican el tiempo con apoyo del sistema GPS.

4.1 Secuencia pseudoaleatoria larga

La secuencia pseudoaleatoria larga es de 42 bits. Su polinomio característico para esta secuencia es:

$$1 + x^7 + x^9 + x^{11} + x^{15} + x^{16} + x^{17} + x^{20} + x^{21} + x^{23} + x^{24} + x^{25} + x^{26} + x^{32} + x^{35} + x^{36} + x^{37} + x^{39} + x^{40} + x^{41} + x^{42}. \quad (5.9)$$

Las máscaras de la secuencia larga son:

MÁSCARA DE LA SECUENCIA LARGA DEL CANAL DE BÚSQUEDA										
41	24	23	21	20	9	8	0			
110001100110100000			PCN		000000000000		PILOT_PN			
MÁSCARA DE LA SECUENCIA LARGA DEL CANAL DE TRÁFICO										
41	32	31								0
1100011000					ESN					
MÁSCARA DE LA SECUENCIA LARGA DEL CANAL DE ACCESO										
41	32	31	28	27	25	24	9	8	0	
1100011111		ACN		PCN		BASE_ID		PILOT_PN		
ACN:		# DE CANAL DE ACCESO								
PCN:		# DE CANAL DE BÚSQUEDA								
BASE_ID:		# IDENTIFICATORIO DE ESTACIÓN BASE								
PILOT_PN:		OFFSET DE LOS CANALES EN FORWARD								
ESN:		NÚMERO DE SERIE ELECTRÓNICA								

Fuente propia

Figura 5. 6 – Máscaras para determinar las secuencias

4.2 Secuencias Pseudoaleatorias cortas

Las secuencias pseudoaleatorias cortas son de 15 bits. Sus polinomios característicos para estas secuencias son:

$$\text{Para el canal I: } 1 + x^2 + x^6 + x^7 + x^8 + x^{10} + x^{15} \quad (5.10)$$

$$\text{Para el canal Q: } 1 + x^3 + x^4 + x^5 + x^9 + x^{10} + x^{11} + x^{12} + x^{15} \quad (5.11)$$

Las secuencias pseudoaleatorias cortas para CDMA contienen 2^n bits en el periodo completo, debido a la inserción de un cero cuando en la salida han aparecido $n-1$ ceros consecutivos.

Pueden haber 512 máscaras para obtener los diferentes offset's de una secuencia corta, entonces para las dos secuencias serían 1024 máscaras posibles. Estas máscaras son guardadas en una memoria de 30 Kb.

5 Sincronismo

Uno de los requerimientos importantes para todo esquema de acceso CDMA consiste en ser capaz en el receptor de sincronizar perfectamente a nivel de chip la secuencia código localmente generada con la secuencia recibida. Este aspecto puede ser especialmente crítico en sistemas de transmisión por paquetes, en los

que cabe la posibilidad de que no se mantenga un canal de forma continuada entre el móvil y la estación base.

En general, es habitual plantear la solución al problema del sincronismo en dos etapas: en primer lugar un ajuste grueso o fase de adquisición, a través del cual se debe garantizar que el desplazamiento temporal máximo entre la secuencia recibida y la localmente generada es inferior a la mitad del período de chip T_c ; Segundo lugar un ajuste fino o fase de seguimiento a través del cual se consigue un alineamiento perfecto entre las dos secuencias.

Para poder sincronizar un usuario útil, el tiempo de propagación de la señal debe ser menor que el T_c , es por eso que el radio de cobertura de una estación base está limitada por el T_c .

$$\text{Radio} < \text{velocidad de la luz} \times T_c \quad (5.12)$$

Donde: $c = \text{velocidad de la luz} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

$$T_c = \frac{1}{1.2288 \times 10^6 \text{ MHz}} \quad (5.13)$$

$$\text{Radio} < 244.14 \text{ m.} \quad (5.14)$$

Además, para poder llevar a cabo estas fases del sincronismo es preciso que el transmisor envíe durante un tiempo la señal de información sin modular o bien modulada con unos ciertos símbolos conocidos, lo que puede efectuarse al inicio de la transmisión como preámbulo o a través de un canal de control, en este caso el canal piloto. Partiendo de esta consideración, existen dos grandes técnicas para la fase de adquisición del sincronismo, como son la búsqueda serie y la búsqueda paralelo.

La denominada búsqueda serie es menos compleja y es de menor tamaño que la búsqueda paralelo, pero necesita un mayor tiempo de adquisición. El esquema de esta búsqueda se presenta en la **Figura 5. 7** Esencialmente consiste en tomar valores de la correlación cada 'm' chips entre la secuencia recibida y la localmente generada y compararlos con un cierto umbral establecido V_t . Si se supera este

umbral, la adquisición se da por concluida. Si después de un tiempo no se ha adquirido la sincronización, entonces se retrasa el generador local un total de $T_c/2$ hasta lograr que las secuencias se encuentren alineadas a lo sumo $T_c/2$. Obsérvese como, según el desfase inicial entre las dos secuencias, pueden ser precisos varios períodos de chip hasta lograr dicho alineamiento.

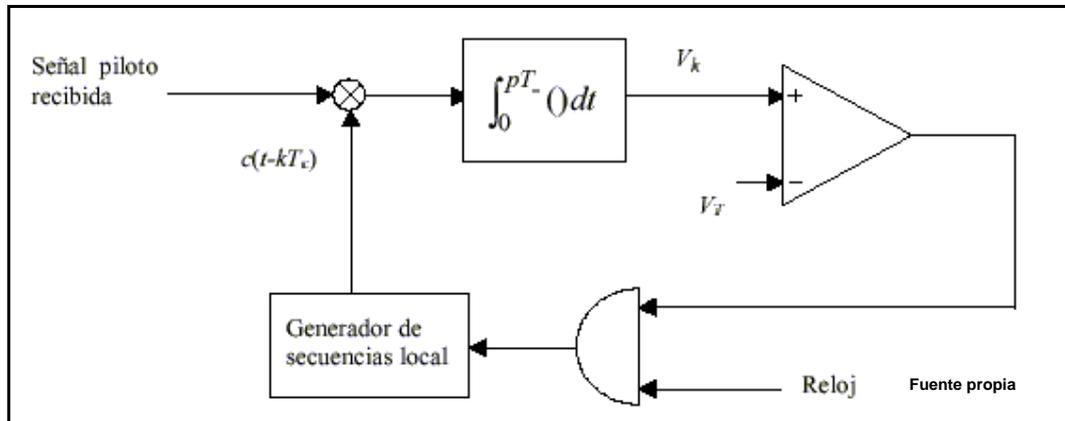


Figura 5. 7 – Sincronismo serial

El esquema de búsqueda paralelo, mostrado en la Figura 5. 8, se basa en multiplicar la secuencia recibida por diferentes versiones de la secuencia localmente generada retardadas $T_c/2$ y escoger aquella de las ramas que presente un mayor nivel a la salida. En cada rama se consideran 'm' chips de la secuencia, de modo que, cuanto mayor sea 'm', más ajustado será el sincronismo pero también se requerirá de un tiempo mayor para lograrlo. En cualquier caso para secuencias de longitud N chips, obsérvese la necesidad de disponer de hasta 2N correladores en paralelo, lo que puede conducir a un esquema de sincronismo excesivamente voluminoso cuando las secuencias son largas, como es habitual en la práctica.

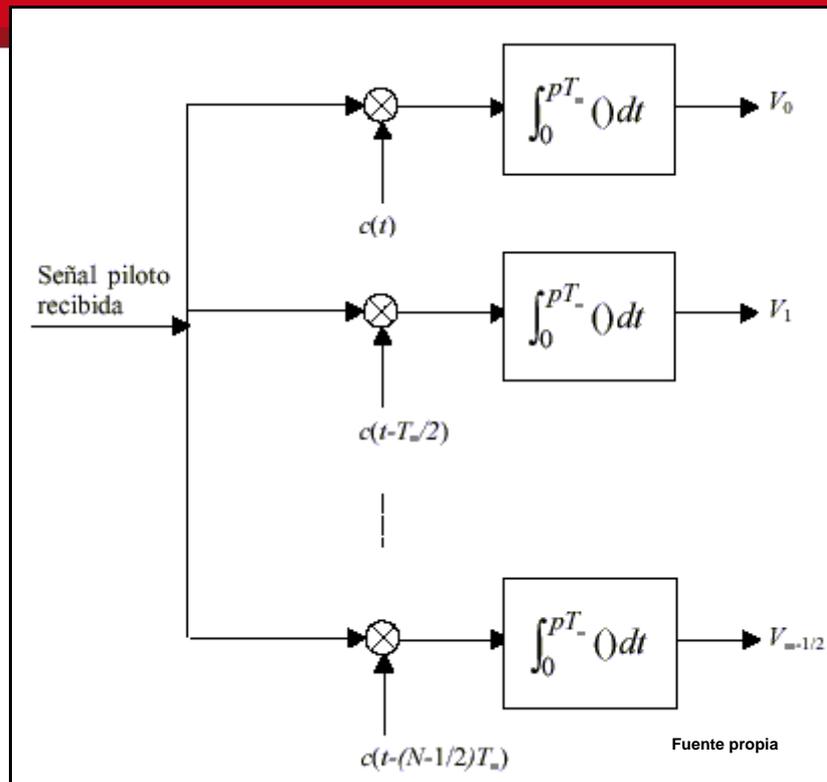


Figura 5. 8 – Sincronismo paralelo

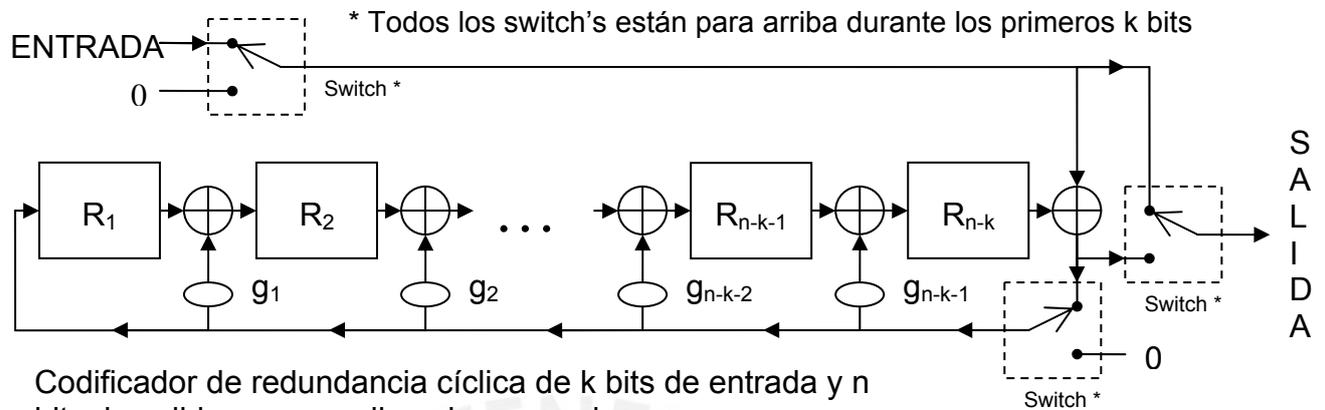
Una vez el sincronismo ha sido adquirido mediante una de las dos estrategias citadas, el siguiente paso consiste en mantenerlo, para lo cual se emplean circuitos DLL (Delay Locked Loop) corrigiendo el desfase en función del error detectado entre las secuencias recibida y generada.

6 Chequeo de Redundancia Cíclica(CRC), relleno de trama y codificador convolucional

La estructura de las tramas varían según su categoría y su velocidad, en el caso del CRC de los canales de tráfico se aplica sólo a los dos canales de mayor velocidad de transmisión, ya sea del enlace directo (Forward Link) ó del enlace inverso (Reverse Link). El CRC contiene un LFSR de 12 bits para la velocidad de 8.6 Kbps y 8 bits para la velocidad de 4 Kbps.

Inicialmente el estado cargado en el LFSR es todos unos lógicos; Al entrar todos los bits de la trama por el LFSR la salida va cambiando. Luego de operar el último bit de la trama, la entrada del LFSR conmuta al cero lógico. Con respecto a la salida del CRC es una conmutación de la trama y la salida del LFSR, de tal manera que

primero transmite todos los bits de la trama y luego la salida de los últimos bits de respuesta del LFSR.



Codificador de redundancia cíclica de k bits de entrada y n bits de salida con su polinomio generador:

$$g(x) = 1 + g_1x + g_2x^2 + \dots + g_{n-k-1}x^{n-k-1} + x^{n-k}$$

Fuente propia

Figura 5. 9 – Chequeo de redundancia cíclica

Los polinomios generadores para el enlace directo (Forward Link) y el enlace inverso (Reverse Link) son :

- A la velocidad de 8600 bps: $x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^9 + x^8 + x^4 + x + 1$. (5.15)

- A la velocidad de 4000 bps: $x^8 + x^7 + x^4 + x^3 + x + 1$. (5.16)

El polinomio generador para el canal de sincronismo, de búsqueda y de acceso:

- $x^{30} + x^{29} + x^{21} + x^{20} + x^{15} + x^{13} + x^{12} + x^{11} + x^8 + x^7 + x^6 + x^2 + x + 1$. (5.17)

El canal piloto es el único que no tiene CRC, relleno de tramas ni codificador convolucional.

El relleno de tramas se aplica a todos los canales menos, como se mencionó en el enunciado anterior, al canal piloto. El relleno de tramas consiste en adherir ocho ceros a la trama, esto se hace para ayudar al codificador convolucional.

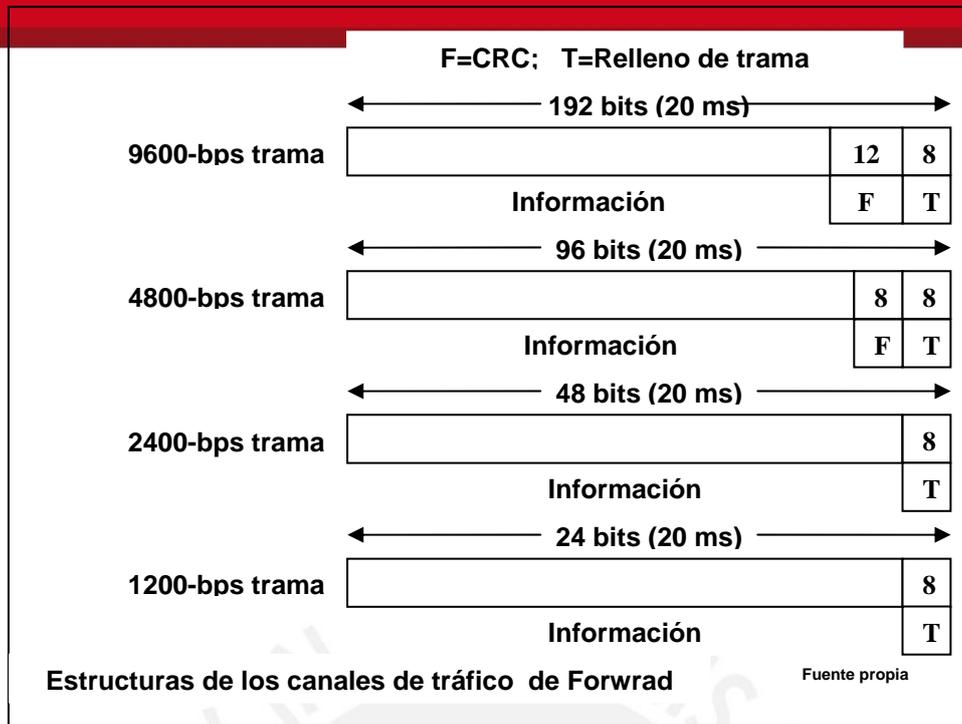


Figura 5. 10 - Tramas del canal de tráfico según su velocidad

El codificador convolucional utilizado en IS-95 CDMA tiene 8 etapas, por lo que se dice que su $k = 9$. En el enlace directo (Forward Link) hay dos “or múltiples”, por lo que se duplica la velocidad de transmisión; mientras que en el enlace inverso (Reverse Link) hay tres “or múltiples”, en este caso se triplica la velocidad de transmisión.

Con este codificador convolucional la recuperación de un dato depende de los anteriores, por lo tanto es necesario la adhesión de 8 ceros al final de cada trama, para que no dependan de las tramas anteriores. Es por eso que es necesario el relleno de tramas. Si dependiera de las tramas anteriores y una de estas estuviera mal, entonces todas las tramas que le siguen no se podrían recuperar.

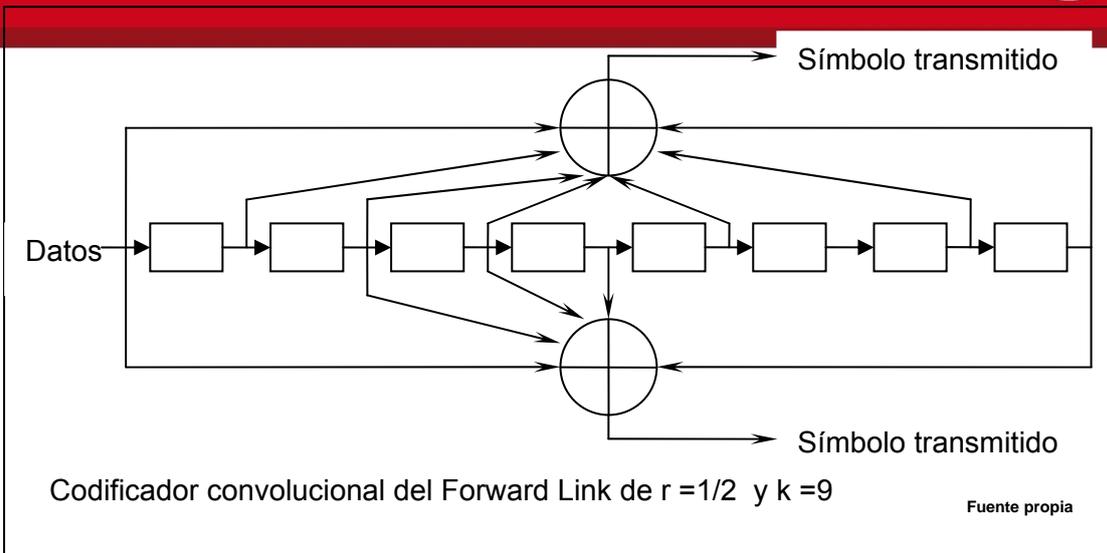


Figura 5. 11– Codificador convolucional del enlace directo (Forward Link) de $r=1/2$ y $k =9$

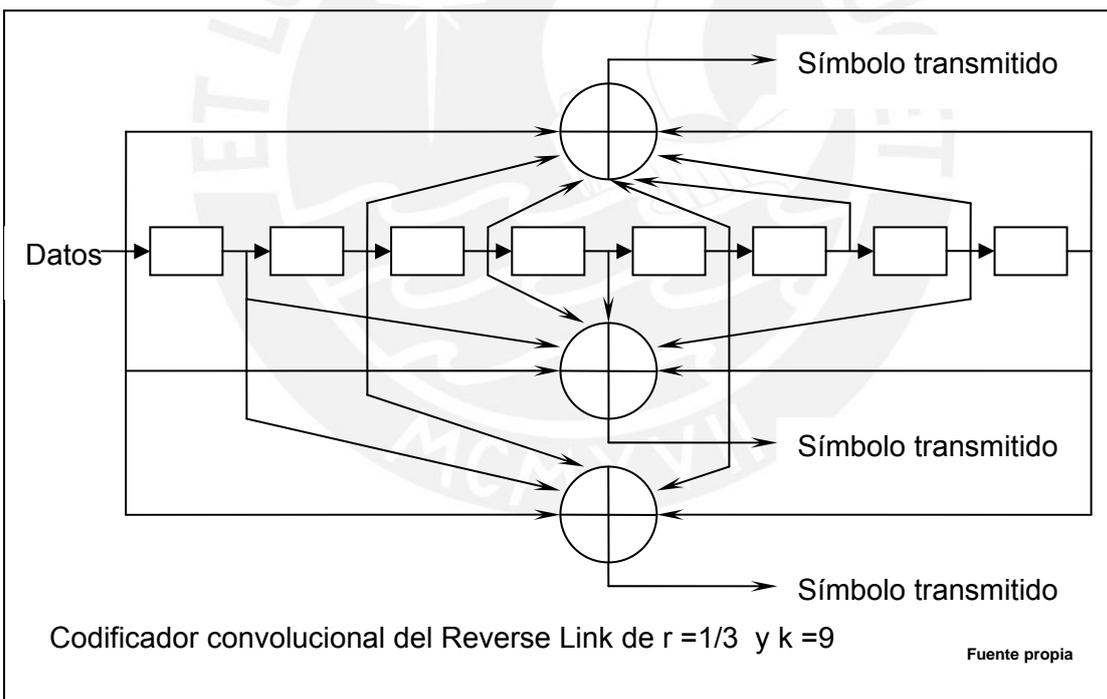


Figura 5. 12 – Codificador convolucional del enlace inverso (Reverse Link) de $r = 1/3$ y $k = 9$

7 Entrelazado (Interleaving)

El entrelazado (Interleaving) es utilizado para dispersar ráfagas de bits o símbolos errados en el tiempo. Por lo que se realiza el entrelazado (Interleaving) antes de

transmitir de tal forma que entrelaza los bits de la señal y después que recibe la información en el receptor realiza el deinterleaving para recobrar el orden original de los bits de la señal. No obstante si hubieran errores, entonces se aprecia un esparcimiento de los bits errados, pero se puede recuperar la información original fácilmente, con ayuda de buenos codificadores.

Un entrelazado (Interleaving) común se trata de guardar en memoria una trama de bits en una matriz de I columnas y J filas. Los datos son escritos en columnas y leídos en filas.

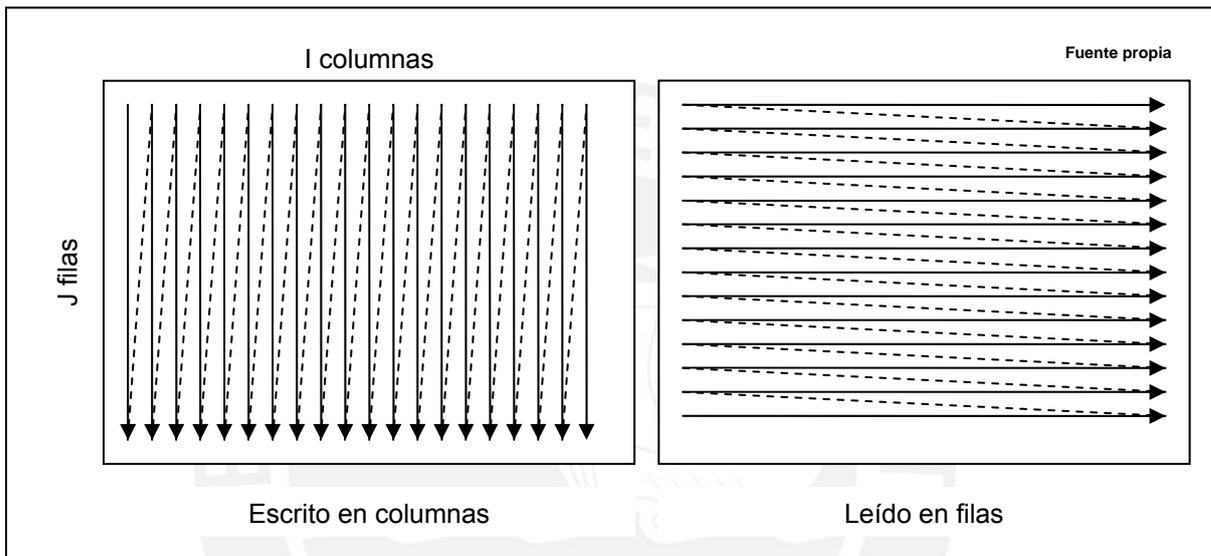


Figura 5. 13 - Entrelazado (Interleaving)

Como muestra la Figura 5. 13 el primer bit guardado en la matriz es escrito en la parte superior izquierda, mientras que el primer bit leído de la misma matriz está ubicado en la parte inferior izquierda.

Por otro lado la mínima separación de bits errados, llamémoslo 'S', está relacionado con la cantidad de bits de la ráfaga de bits en error, llamémoslo 'B'.

$$S = \begin{cases} J & B \leq I \\ 1 & B > I \end{cases} \quad (5.18)$$

Es deducible que primero tiene que llenarse completamente la matriz del entrelazado (Interleaving) para transmitir; por lo tanto se demorará I*J tiempos de bit.

Para la recepción también se demorará el mismo tiempo que el emisor, en consecuencia tendrá un retardo total de $2 \cdot I \cdot J$ tiempos de bit.

Otra estrategia del entrelazado (Interleaving) empleada por el canal de sincronismo es una técnica llamada 'bit inverso'. Esta técnica consiste en tener los 128 bits de la trama del canal de sincronismo de 20 ms. de duración, cuyo primer bit es asignado como la posición '0' y el último como la posición '127'. Luego la posición en números binarios es invertida, es decir, se escribe el número de la posición desde el bit menos significativo hasta el bit más significativo, ese número resultante es cambiado de vuelta a decimal, de tal manera que sea la nueva posición del bit. La trama es guardada en columnas en una matriz de 16 filas por 8 columnas y es transmitida en columnas, más no en filas, después del proceso de entrelazado (Interleaving). Esta matriz no interviene en el proceso de entrelazado (Interleaving), sólo sirve para el almacenamiento de los bits en memoria.

El retardo total para este canal es $D = 256 \text{ bits} / 4800 \text{ bps} = 53.333... \text{ ms}$.

EL canal de búsqueda y el canal de tráfico para el enlace directo (Forward Link), tienen una trama de 384 símbolos en 20 ms. al entrar en el bloque de entrelazado (Interleaving). Este bloque de entrelazado (Interleaving) utiliza una matriz de 6 columnas y 64 filas, escritas en columnas y leídas en filas en diferente orden. Exponiendo mejor la posición de las filas desde '0' hasta '63' son entrelazados con la técnica de 'bit inverso', explicado anteriormente. Es decir la posición de la fila en número binario es invertida, de esta manera el resultado es la nueva posición de la fila. Con esta técnica aumenta el 'S' (separación mínima entre símbolos errados) cuando 'B' > 1 (6 símbolos) a comparación del primer entrelazado (Interleaving) explicado.

$$S = \begin{cases} 64 & B \leq 5 \\ 32 & B = 6 \\ 16 & B = 7 \\ 3 & 8 \leq B \leq 48 \\ 2 & 49 \leq B \leq 96 \\ 1 & B \geq 97 \end{cases} \quad (5.19)$$

La trama es guardada, en columnas en una matriz de 24 filas por 16 columnas y es transmitida en columnas, más no en filas, después del proceso de entrelazado

(Interleaving). Esta matriz no interviene en el proceso de entrelazado (Interleaving), sólo sirve para el almacenamiento de los símbolos en memoria.

El retardo total para este canal es $D = 768 \text{ símbolos} / 19200 \text{ sps} = 40 \text{ ms}$.

Los canales de acceso y de tráfico en el enlace inverso (Reverse Link) utilizan el mismo proceso que los canales de búsqueda y de tráfico en el enlace directo (Forward Link), pero con diferentes dimensiones de la matriz de entrelazado (Interleaving). Los canales de acceso y de tráfico en el enlace inverso (Reverse Link) tienen una trama de 20 ms. de duración con 576 símbolos, escritos en una matriz de 18 columnas por 32 filas. Las posiciones de las filas desde '0' hasta '31' son entrelazados con la técnica de 'bit inverso', como en el caso anterior. Entonces podemos encontrar la mínima separación entre símbolos errados:

$$S = \begin{cases} 32 & B \leq 17 \\ 16 & B = 18 \\ 8 & B = 19 \\ 3 & 20 \leq B \leq 72 \\ 2 & 73 \leq B \leq 144 \\ 1 & B \geq 145 \end{cases} \quad (5.20)$$

Y por último el retardo total para este canal es $D = 1152 \text{ símbolos} / 28800 \text{ sps} = 40 \text{ ms}$.

8 Canales en el enlace directo (Forward Link)

Los canales en el enlace directo (Forward Link) o también llamados downlink transmiten las señales desde la estación base hasta el equipo móvil.

Consiste en la transmisión de 64 canales ortogonales simultáneamente. Estos canales son:

- H0 : código Hadamard 0, usado en el canal piloto.
- H1-H7 : usado en los canales de búsqueda (7 canales de voz).
- H32 : usado en el canal de sincronismo.
- H8-H31 y H33-H63 : usados en los canales de tráfico

Para esta tesis la nomenclatura de canal puede ser CH o H.

En la última etapa la señal es duplicada para que cada una sea combinada con una secuencia corta de 15 bits. Las secuencias son distintas y deben tener el mismo valor de fase. A continuación de las combinaciones se realiza la modulación QPSK.

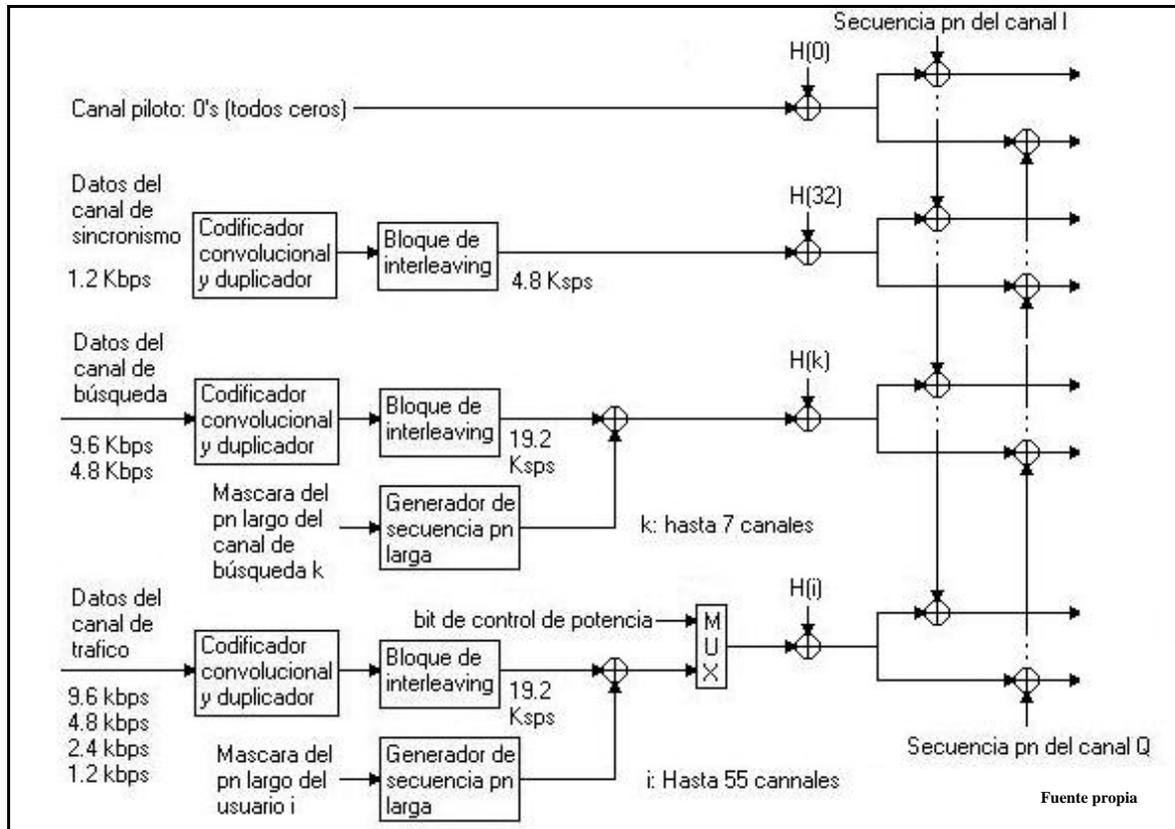
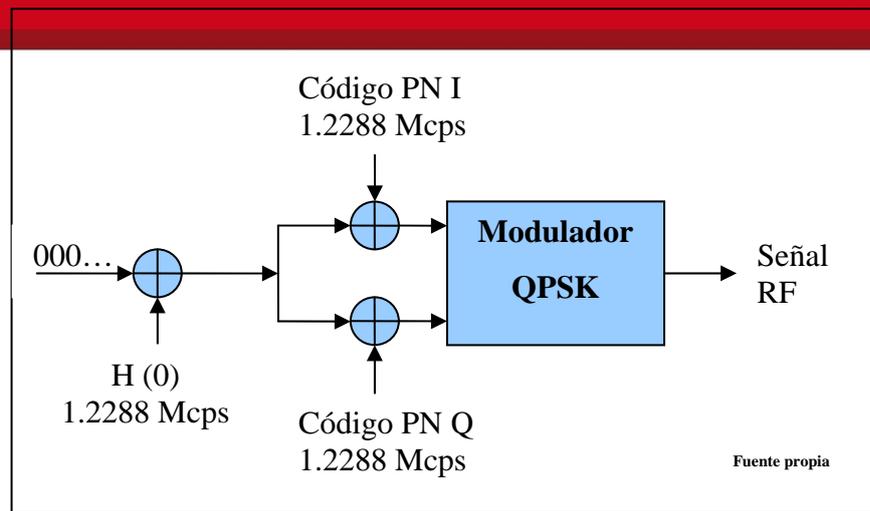


Figura 5. 14 – Canales en el enlace directo (Forward Link)

8.1 Canal Piloto

El canal piloto es transmitido a mayor potencia que los otros canales.

Le corresponde el código Hadamard '0', el cual tiene todos sus dígitos ceros, y además el canal piloto transmite ceros lógicos.


Figura 5. 15 – Canal piloto

Este canal es usado, principalmente, como una referencia de fase de la demodulación de los otros canales, es decir, este canal es crucial para la sincronía de la información. También es utilizado en el control de potencia, específicamente en el control de potencia de lazo abierto, el cual se tratará más adelante.

Con respecto a la fase de la demodulación, se relaciona con las secuencias pseudoaleatorias cortas (PN cortas). Hay dos secuencias PN cortas de $2^{15} = 32768$ chips, las cuales sirven en la etapa de modulación en cada estación base. Cada estación base tiene las mismas PN cortas pero con diferente offset o fase de modulación. El canal piloto como no tiene información, entonces es como si transmitiera solo las secuencias PN cortas; para hallar la fase de modulación. No obstante la fase de modulación y la fase de demodulación deben ser las mismas para que se sincronice el equipo móvil a la estación base. Cada fase de demodulación es de 64 chips. De tal manera que se pueden tener $2^{15}/64 = 512$ estaciones bases trabajando con la misma portadora y trabajando sin tener en consideración la estación base adyacente.

Se pueden poner mas estaciones bases, pero la fase de la modulación de las estaciones adyacentes deben ser distintas; o utilizar otra portadora.

Matemáticamente, se recibe unos cuantos chips, supongamos 'm' la cantidad de chips, de las secuencias PN cortas. 'm' es menor que la cantidad de chips del

periodo completo de las secuencias PN cortas, es decir, 2^{15} chips, equivalente a 26.66 ms. . Luego se realiza una correlación parcial con los 'm' chips recibidos y los primeros 'm' chips de las secuencias de PN cortas sin offset, resultando un valor en ese instante. Luego si en ese instante ese resultado es igual a un valor conocido, el cual es el valor más alto, entonces hallamos el instante buscado. Si no es, se repite la operación hasta hallarlo. Mientras más tiempo se demore en encontrar el valor, entonces el móvil tardará en sincronizarse. Es así que se escoge, la referencia de la fase de demodulación o referencia de offset de las secuencias PN cortas para poder demodular, aunque no se ha identificado a la estación base.

8.2 Canal de Sincronismo

Después de obtener la sincronización de tramos de 26.66 ms. con el canal piloto, se prosigue a recibir el canal de sincronismo. El canal de sincronismo transmite el mensaje de sincronismo, el cual ayuda a sincronizarse con el tiempo absoluto. En este mensaje se envía el offset o fase de modulación, que le corresponde a esa estación base, para identificar a la estación base. Luego se envía el estado de la secuencia pseudoaleatoria larga de 42 bits, para que este estado sea cargado en el generador de la secuencia PN larga.

El código Hadamard '32' es utilizado para este canal, conformado por 32 ceros lógicos seguido de 32 unos lógicos, de tal forma que sea una onda cuadrada. Se escogió este código para que sea más fácil su adquisición.

La trama del canal de sincronismo es de 32 bits en 26.666... ms., de tal manera que sea el tiempo del periodo de las PN cortas. Luego cada 3 tramas se forma una supertrama, la cual estaría compuesta por 96 bits en 80 ms.

Para que se identifique el comienzo de la supertrama entonces el primer bit de las tramas identifica si es la primera trama de la supertrama o si no lo es.

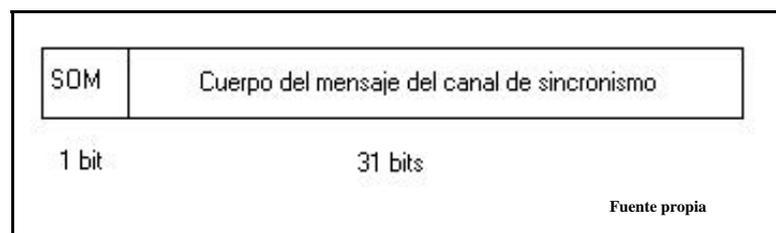


Figura 5. 16 – Trama del canal de sincronismo

La velocidad de transmisión del canal de sincronismo es de 1200 bps. Para que esta información sea protegida entonces se aplica un codificador convolucional, resultando a su salida una velocidad de 2400 sps (símbolo por segundo), estos a su vez son duplicados a una velocidad de 4800 sps y por último son entrelazados en el proceso de entrelazado (Interleaving), para que la separación entre bits errados sea la más grande posible.

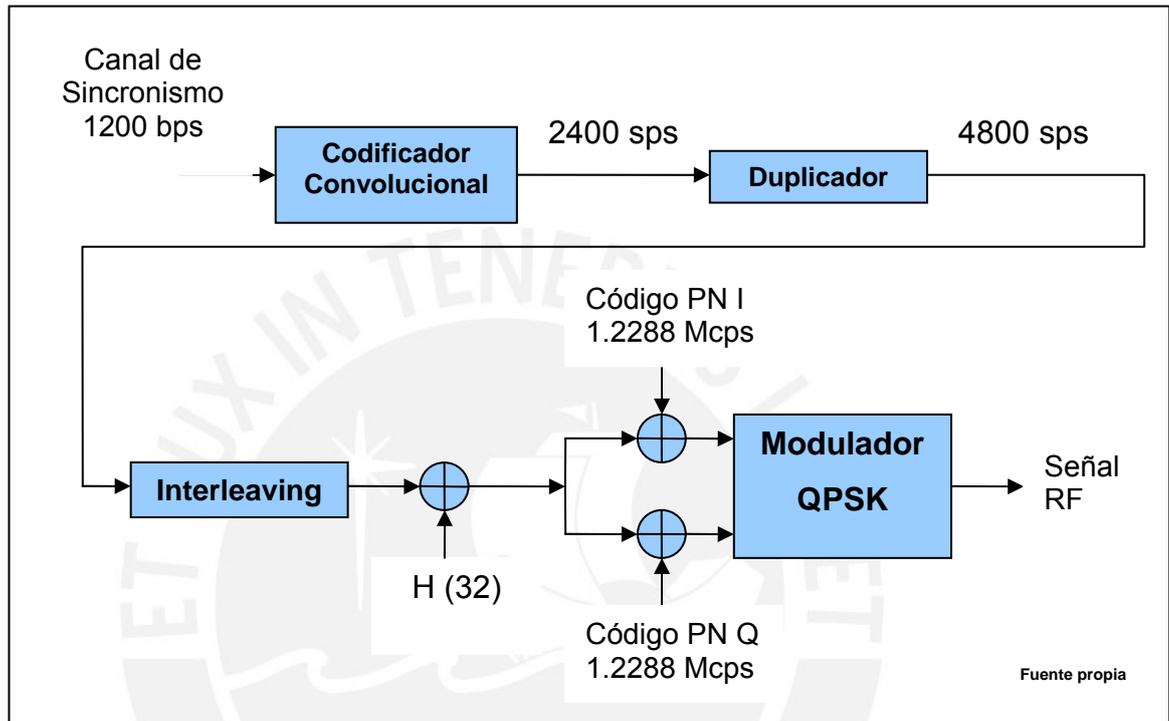


Figura 5. 17 – Canal de sincronismo

8.3 Canal de Búsqueda

Los canales de búsqueda son usados para alertar al móvil de una llamada entrante. Existen como máximo 7 canales de búsqueda, a los cuales les corresponden códigos Hadamard desde el '1' hasta el '7'. De estos canales hay una que se le denomina canal de búsqueda activa.

Con respecto a la cantidad de canales de búsqueda, algunos de estos pueden funcionar como canales de tráfico. Todos los canales se dividen en 2048 times slots, es decir, ranuras de tiempo.

El proceso es el siguiente, después que el móvil se sincronizó completamente, el móvil busca un slot del canal de búsqueda activa con una función llamada halsh.

Este número (2048) es suficientemente grande para que 2 o más móviles no escuchen a la vez el mismo slot del canal. Cada slot es de 80 ms., es decir, que puede esperar desde 80 ms. hasta 163.84 seg. para recibir la información del canal de búsqueda activo. En la información enviada por el canal de búsqueda activo, se le asigna aleatoriamente un canal de búsqueda y un slot del mismo. En este canal y slot asignado se enviará información de la llamada entrante.

La velocidad de la transmisión de los canales de búsqueda es de 9.6 ó 4.8 Kbps. Los datos entran primero en un codificador convolucional resultando una velocidad duplicada de 19.2 ó 9.6 Ksps¹ según sea el caso. Luego entran en un bloque de repetidor condicional, de tal manera que si los datos están con una velocidad de 9.6 Ksps, entonces se duplican resultando así una velocidad de 19.2 Ksps; y si los datos están a 19.2 Ksps no se duplican. A continuación de estos bloques sigue el entrelazado (Interleaving) de 16 columnas por 24 filas.

Todos los canales de búsqueda son transmitidos a una misma potencia. En estos canales se utilizan las secuencias PN largas desplazadas con el offset de la secuencia larga. El offset de la secuencia larga es obtenido de la combinación de la secuencia larga y una máscara. Las máscaras son derivadas del canal de búsqueda en cada estación base. Tiene el siguiente formato:

11000110011010000xxx000000000000yyyyyyyyy

Donde 'xxx' es el número de canal de búsqueda y 'yyyyyyyyy' es el número identificador o el offset de la estación base.

La secuencia PN larga es muestreada cada 64 chips, porque muestreándolo así resultaría la misma velocidad de 19.2 Ksps de los datos codificados, después del proceso de entrelazado (Interleaving). Posteriormente se combinan la secuencia muestreada PN larga con los datos codificados.

¹ Ksps significa Kilo símbolo por segundo.

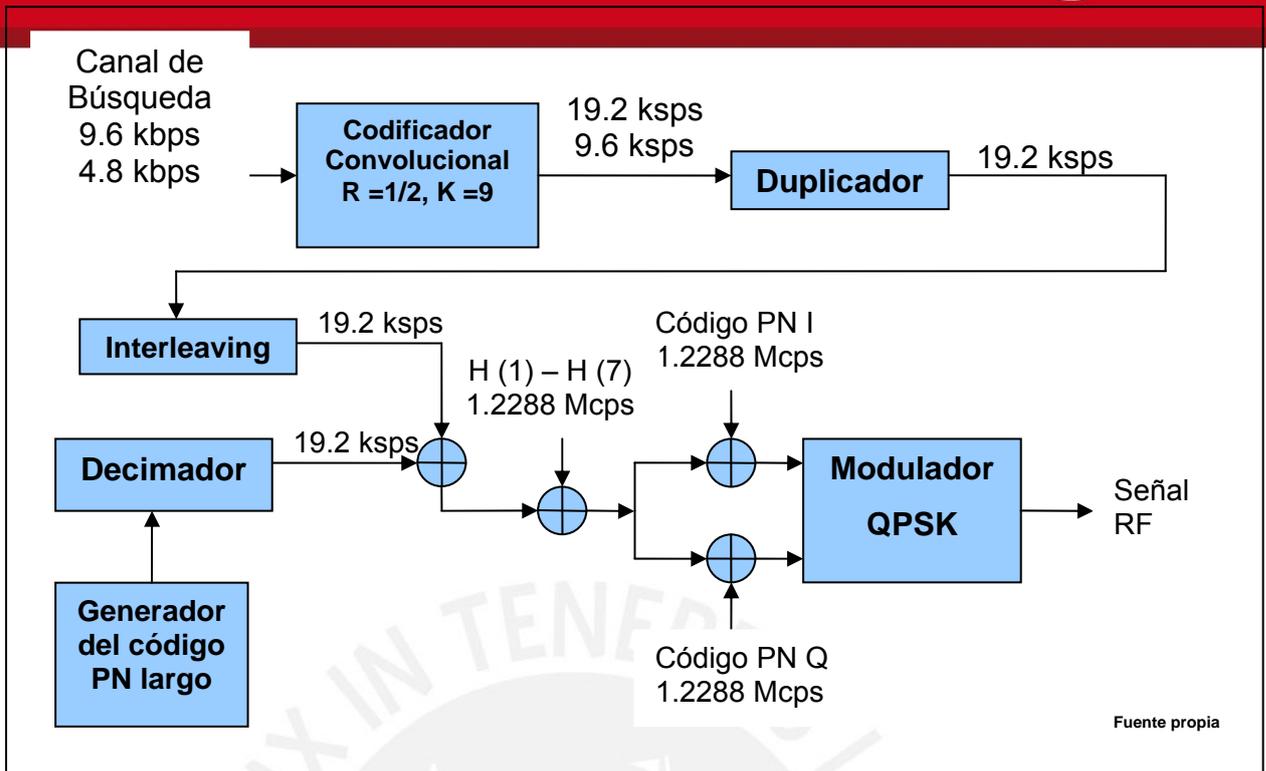


Figura 5. 18 – Canal de Búsqueda

Por último la señal es combinada con el código Hadanard, expandiendo la señal a 1.2288 Mcps¹.

8.4 Canal de Tráfico

Existen 55 canales de tráfico en forward para transmitir la voz digitalizada o datos del usuario con velocidades variadas de 8.6, 4.0, 2.0 y 0.8 Kbps. Los Códigos Hadamark del '8' al '31' y del '33' al '63' son designados para estos tipos de canales.

Primero la información de la voz digitalizada o los datos separadas en tramas de 172, 80, 40, y 16 bits por cada 20ms. entran en un CRC (cyclic redundancy check), para detectar algún error en cada trama, pero sólo las dos velocidades más altas son chequeadas, es decir, las tramas con velocidades de 8.6 y 4.0 Kbps; Y las dos restantes no las chequea. En el CRC, las tramas que tienen 172 bits se le agregan 12 bits, y a las de 80 bits se le agrega 8 bits; resultando velocidades de 9.2 y 4.4 Kbps respectivamente. Segundo paso, entra en un codificador de cola, el cual aumenta 8 bits a cada trama, generando velocidades

¹ Mcps Significa Mega chips por segundo

de 9.6, 4.8, 2.4 y 1.2 Kbps correspondientes a 192, 96, 48 y 24 bits por trama.

Tercero ingresan en un codificador convolucional resultando velocidades en su salida de 19.2, 9.6, 4.8 y 2.4 Ksps. Cuarto, ingresa a un repetidor condicional dependiendo de su velocidad. Para la velocidad de 2.4 Ksps se repite ocho veces; Para la velocidad de 4.8 Ksps se repite cuatro veces; Para la velocidad de 9.6 Ksps se repite dos veces; Y para la velocidad de 19.2 Ksps no se repite. Por lo tanto, al final de esta etapa genera una velocidad de datos de 19.2 Ksps, sea cual fuese su velocidad. Quinto, después del repetidor condicional pasa al bloque de entrelazado (Interleaving) de 16 columnas por 24 filas. Como se puede deducir la trama es de 384 bits. Sexto, cada canal tiene un offset único de la secuencia larga de 42 bits para asegurar la privacidad del canal de tráfico. La secuencia larga de 42 bits es muestreada cada 64 bits o símbolos; El resultado es mezclado con la salida del bloque de entrelazado (Interleaving). Después de la mezcla entra en un multiplexor, para que en la señal también transmita algunos bits de control de potencia.

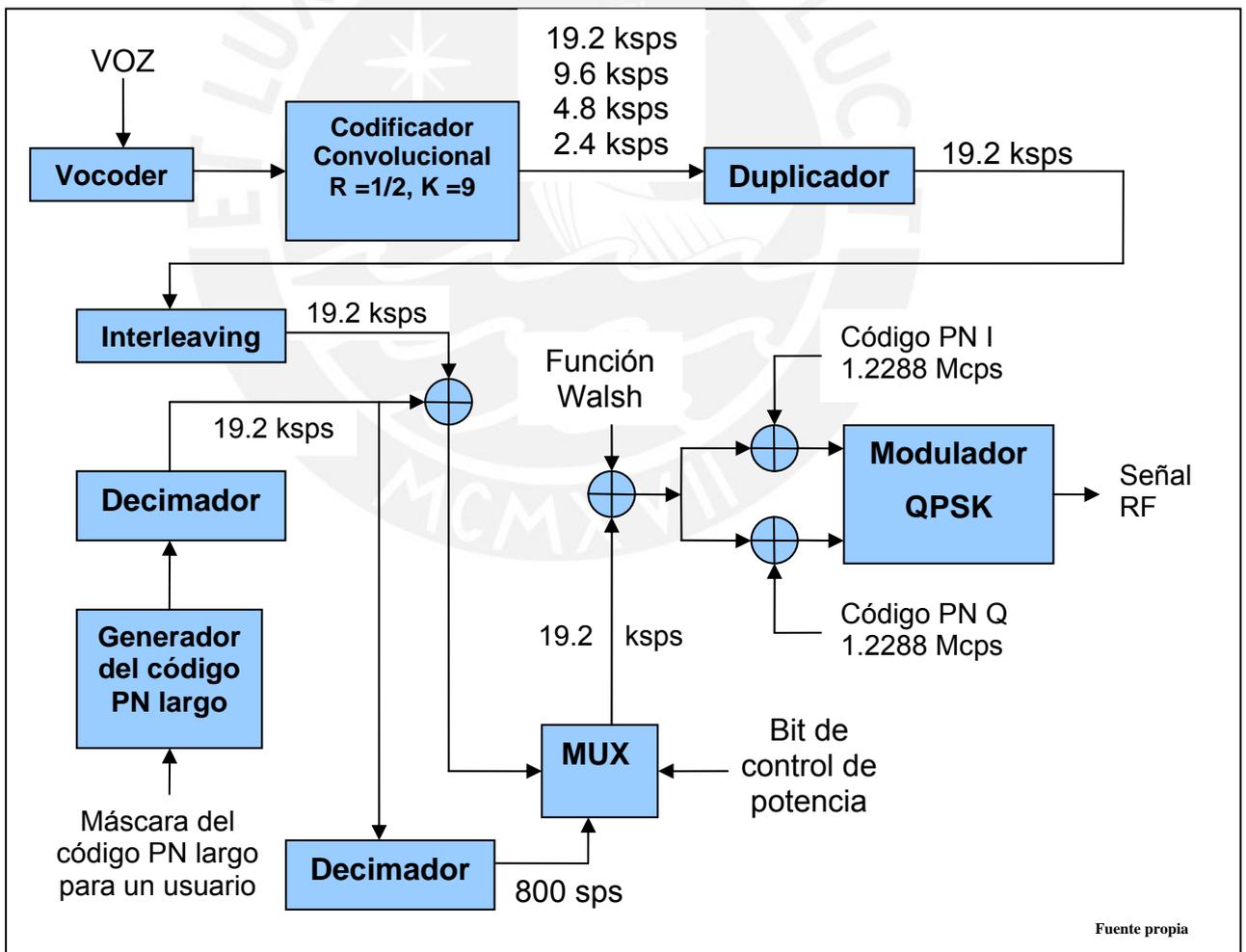


Figura 5. 19 – Canal de Tráfico

9 Canales en el enlace inverso (Reverse Link)

Los canales del enlace inverso (Reverse Link) son los que transmiten de una estación móvil a la estación base. El mismo offset de la secuencia larga de 42 bits del enlace directo (Forward Link) es utilizado para el enlace inverso (Reverse Link). Además esta secuencia es el código al que se refiere el concepto de CDMA en el enlace inverso (Reverse Link). En el enlace directo (Forward Link) el “C” referente a CDMA es el código Hadamard utilizado para diferenciar a cada usuario.

Hay dos clases de canales para el enlace inverso (Reverse Link):

- Access Channel
- Traffic Channel

Estos canales en su último bloque la señal es duplicada para que cada una sea combinada con un secuencia corta de 15 bits. La fase de estas secuencias es cero, es decir no tiene offset. Después de las combinaciones se realiza la modulación OQPSK.

9.1 Canal de Acceso

El canal de acceso es utilizado por un usuario para empezar una llamada, responder al canal de búsqueda ó mandar alguna información requerida por la estación base.

Con respecto a la cantidad de canales de acceso pueden haber, como mínimo un canal y como máximo 32 canales de acceso para cada canal de búsqueda.

Los canales de acceso son generados a una velocidad de 4.4 Kbps ó 88 bits por 20 ms., los cuales entran en un codificador de cola, aumentando 8 bits para cada trama, generando 4.8 Kbps. Luego ingresa en un codificador convolucional, el cual triplica la velocidad a 14.4 Ksps, después se repite los datos generando 28.8 Ksps.. Más adelante sigue el proceso de entrelazado (Interleaving) de 18 columnas por 32 filas. Esto quiere decir que el tamaño de la trama es de 576 bits. A continuación sigue el codificador Walsh. A la salida de este codificador se produce una velocidad de 307.2 Kcps¹. Seguidamente es expandido en el espectro con la secuencia larga de 42 bits con su respectivo desplazamiento o offset a 1.2288 Mcps. El desplazamiento es calculado con ayuda de su máscara. La máscara es construida en base al canal de acceso calculado aleatoriamente,

¹ Kcps significa Kilo chips por segundo

el número de canal de búsqueda y parámetros de la estación base. Por último es combinada con las secuencias cortas de 15 bits, estas secuencias a diferencia de los canales del enlace directo (Forward Link), no tienen offset o desplazamiento, por lo tanto todos los usuarios utilizan el mismo offset. La única forma de identificar a cada usuario es con la fase de la secuencia larga.

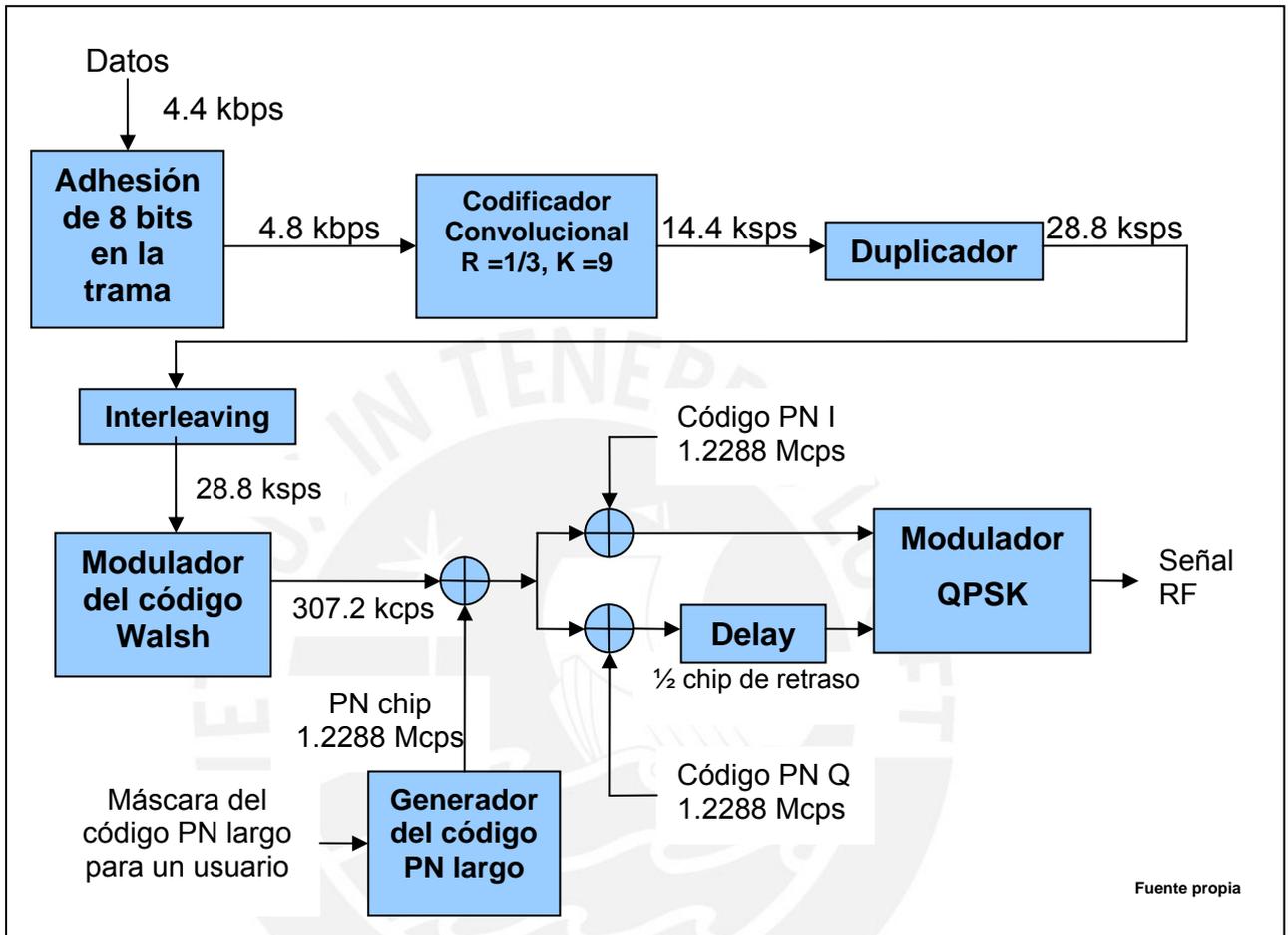


Figura 5. 20 – Canal de acceso

Todos los canales de acceso tienen intervalos de tiempo llamados slots. El comienzo de la transmisión es retrasada con un tiempo aleatorio, para evitar colisiones de equipos móviles que quieran transmitir a la vez en el mismo canal. Y en el comienzo de la transmisión se envía un preámbulo de 96 bits en ceros, para ayudar a la estación base en adquirir la señal, es decir, que su nivel de potencia sea el adecuado.

9.2 Canal de Tráfico

Puede haber como máximo 62 canales de tráfico en el enlace inverso (Reverse Link). Las velocidades que trabaja son 8.6, 4.0, 2.0, 0.8 Kbps, los cuales tienen 172, 80, 40, y 16 bits por cada trama o 20ms..

Primero, al igual que en el enlace directo (Forward Link), la información tiene un CRC y codificador de cola; de esta manera se genera una velocidad de 9.6, 4.8, 2.4 y 1.2 Kbps al final del codificador de cola. Segundo, la señal ingresa a un codificador convolucional, resultando tres veces la velocidad de la señal de entrada. Estas son 28.8, 14.4, 7.2 y 3.6 Ksps según su velocidad. Tercero, entra a un repetidor condicional, generando en su salida 28.8 Ksps, dependiendo de su velocidad. Cuarto, a continuación está el entrelazado (Interleaving) de 18 columnas por 32 filas. Después sigue el codificador Walsh, resultando una velocidad de transmisión de 307.2 Kcps. Quinto, se utiliza la secuencia larga de 42 bits desplazada para identificar a un usuario. El desplazamiento o offset es hallada a partir de su máscara. La máscara depende del ESN (Electronic Serial Number) o serie electrónica. Las máscaras del enlace directo (Forward Link) y del enlace inverso (Reverse Link) son iguales, en consecuencia los offset's del Forward y Reverse son los mismos. Sexto, al igual que los canales de acceso, los canales de tráfico también son combinados con las secuencias cortas sin desplazamiento.

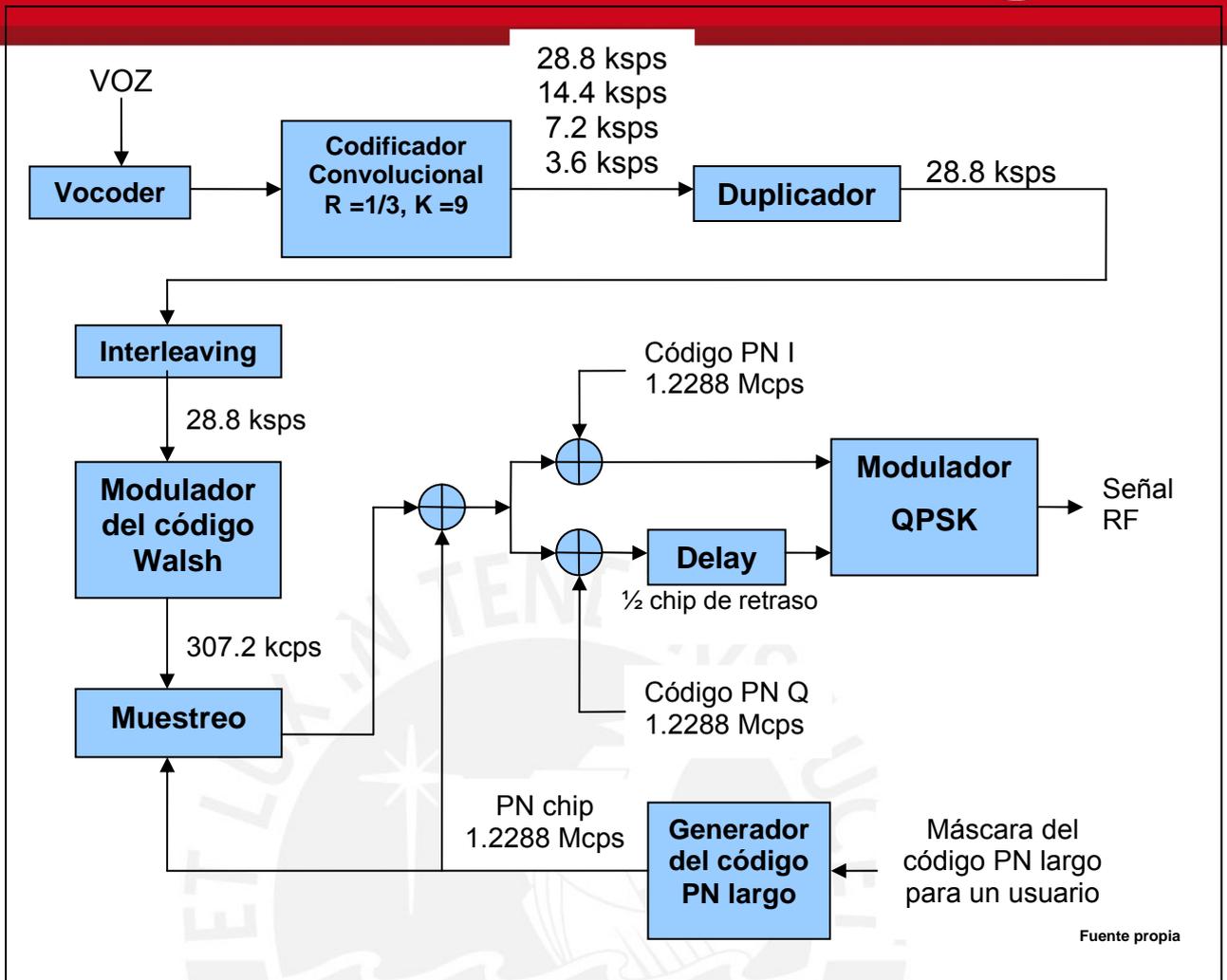


Figura 5. 21 – Canal de tráfico

Al comienzo de la transmisión es enviado un preámbulo de ceros para ayudar a la estación base adquirir la señal.

10 Probabilidad de error

Supongamos que la señal de un usuario sea la siguiente:

$$B_i(t) = \sum_n b_i(n) p_b(t - nT_b) \tag{5.21}$$

Donde:

n: Cantidad de bits para transmitir

T_b : tiempo de bit

P_b : Pulso de periodo T_b .

$b_i(n)$: secuencia de bits del usuario i

Cada usuario transmite su señal combinada con un código:

$$a_i(t) = \sum_n \sum_{k=0}^{N-1} c_i(k) p_c(t - nT_b - kT_c) \quad (5.22)$$

Donde: T_c : Tiempo de chip.
 P_c : Pulso de periodo T_c .
 $c_i(t)$: secuencia de chips del código.
 N : El número de chips del código.

En el espectro radioeléctrico ó en el aire se tendrá lo siguiente:

$$r(t) = AB_0(t)a_0(t) \cos(2\pi f_0 t) + \sum_{i=1}^{K-1} AB_i(t - \tau_i) a_i(t - \tau_i) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_i) + n(t) \quad (5.23)$$

Donde: K : Número de usuarios
 $0 \leq i < K$.
 $n(t)$: Ruido térmico
 A : Amplitud constante por todos los usuarios (Gracias al control de potencia)

Se considerará al usuario 0 como el usuario útil con cuya secuencia se encuentra sincronizado al receptor, de modo que τ y φ representan el retardo y el desfase respectivamente de las señales del resto de usuarios con respecto de la del usuario útil, pues se considera un sistema CDMA asíncrono en que, debido a los diferentes tiempos de propagación, no existe sincronización entre las señales recibidas. τ y φ son variables aleatorias distribuidas uniformemente entre 0 y T_b , y entre 0 y π , respectivamente.

De este modo la señal a la entrada del integrador de periodo T_b será:

$$w(t) = \frac{A}{2} B_0(t) + \sum_{i=1}^{K-1} \frac{A}{2} B_i(t - \tau_i) a_i(t - \tau_i) a_0(t) \cos(\varphi_i) + n(t) a_0(t) \cos(2\pi f_0 t) \quad (5.24)$$

Para estimar cual es el valor de la E_b/N_0 a la salida del receptor es preciso analizar el valor resultante de integrar en periodos de bit la señal $w(t)$ distinguiendo por un

lado el término de señal útil y por el otro el término de interferencia y ruido. Sin pérdida de generalidad, se considerará la integración únicamente en el período de 0 a T_b correspondiente al bit $b_0(0)$ del usuario útil. En consecuencia, el término correspondiente a la señal útil será:

$$Z_0 = \int_0^{T_b} \frac{A}{2} B_0(t) dt = \frac{AT_b}{2} b_0(0) \quad (5.25)$$

La varianza para la señal útil es:

$$E[Z_0^2] = \frac{A^2 T_b^2}{4} \quad (5.26)$$

Mientras que el término debido al ruido térmico será:

$$Z_n = \int_0^{T_b} n(t) a_0(t) \cos(2\pi f_0 t) dt = \sum_{l=0}^{N-1} c_0(l) \int_{lT_c}^{(l+1)T_c} n(t) a_0(t) \cos(2\pi f_0 t) dt \quad (5.27)$$

El ruido térmico tiene una densidad espectral de $N_0/2$.

Por lo tanto su varianza se puede calcular como:

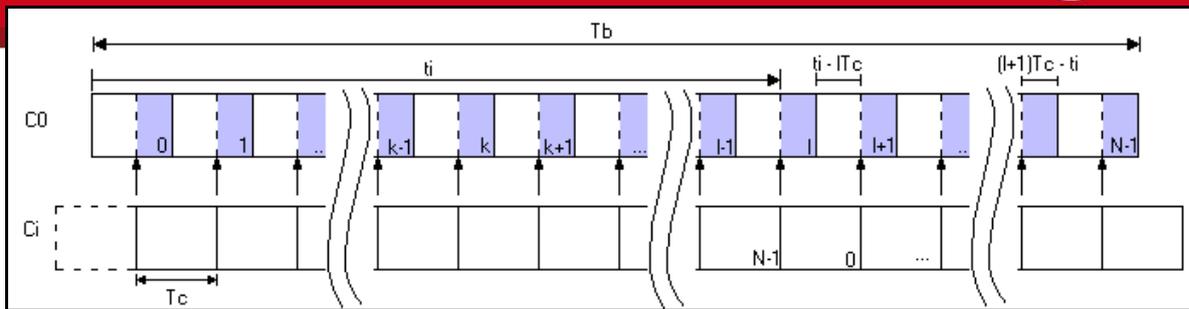
$$E[Z_n^2] = \sum_{l=0}^{N-1} \int_{lT_c}^{(l+1)T_c} E[n^2(t)] \cos^2(2\pi f_0 t) dt = \frac{NT_c N_0}{4} = \frac{T_b N_0}{4} \quad (5.28)$$

Además $NT_c = T_b$.

Ahora consideraremos la interferencia del resto de usuarios:

$$Z_i = \frac{A}{2} \cos \varphi_i \int_0^{T_b} B_i(t - \tau_i) a_i(t - \tau_i) a_0(t) dt \quad (5.29)$$

$$Z_i = \frac{A}{2} \cos \varphi_i \left[b_i(-1) \int_0^{\tau_i} a_i(t - \tau_i) a_0(t) dt + b_i(0) \int_{\tau_i}^{T_b} a_i(t - \tau_i) a_0(t) dt \right] \quad (5.30)$$



Fuente propia

Figura 5. 22 – Probabilidad de error

Se considerará $l \leq \tau_l \leq l+1$.

Donde:

$$\int_0^{\tau_l} a_i(t - \tau_l) a_0(t) dt = (\tau_l - lT_c) \sum_{k=0}^l c_0(k) c_i(N-l+k-1) + ((l+1)T_c - \tau_l) \sum_{k=0}^{l-1} c_0(k) c_i(N-l+k-1)$$

$$= c_{i,0}(l-n)T_c + [c_{i,0}(l+1-N) - c_{i,0}(l-N)](\tau_l - lT_c) = R_{i,0}(\tau_l) \quad (5.31)$$

$$\int_{\tau_l}^{T_b} a_i(t - \tau_l) a_0(t) dt = (\tau_l - lT_c) \sum_{k=l+1}^{N-1} c_0(k) c_i(k-l-1) + ((l+1)T_c - \tau_l) \sum_{k=l}^{N-1} c_0(k) c_i(k-l)$$

$$= c_{i,0}(l)T_c + [c_{i,0}(l+1) - c_{i,0}(l)](\tau_l - lT_c) = \hat{R}_{i,0}(\tau_l) \quad (5.32)$$

Donde:

$c_{i,0}(d)$: es la correlación de dos códigos desplazados 'd' unidades

Por lo tanto:

$$Z_i = \frac{A}{2} \cos \varphi_i [b_i(-1)R_{i,0}(\tau_i) + b_i(0)\hat{R}_{i,0}(\tau_i)] \quad (5.33)$$

La varianza de Z_i :

$$E[Z_i^2] = \frac{A^2}{4} E[\cos^2 \varphi] E[(b_i(-1)R_{i,0}(\tau_i) + b_i(0)\hat{R}_{i,0}(\tau_i))^2] \quad (5.34)$$

$$E[Z_i^2] = \frac{A^2}{8T_b} \int_0^{T_b} (R_{i,0}^2(\tau_i) + \hat{R}_{i,0}^2(\tau_i)) d\tau_i = \frac{A^2}{8T_b} \sum_{l=0}^{N-1} \int_{lT_c}^{(l+1)T_c} (R_{i,0}^2(\tau_i) + \hat{R}_{i,0}^2(\tau_i)) d\tau_i$$

$$= \frac{A^2 T_b^2}{24N^3} r_{i,0} \quad (5.35)$$

Siendo

$$r_{i,0} = \sum_{l=0}^{N-1} c^2_{i,0}(l-N) + c^2_{i,0}(l+1-N) + c_{i,0}(l-N)c_{i,0}(l+1-N) + c^2_{i,0}(l) + c^2_{i,0}(l+1) + c_{i,0}(l)c_{i,0}(l+1) \quad (5.36)$$

Así mismo, la potencia total de interferencia y ruido que percibirá el usuario útil será:

$$\sigma = E[Z_n^2] + \sum_{i=1}^{K-1} E[Z_i^2] = \frac{T_b N'_0}{4} + \frac{A^2 T_b^2}{24 N^3} \sum_{i=1}^{K-1} r_{i,0} \quad (5.37)$$

Por último el E_b/N_0 :

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{A^2 T_b}{N'_0 + \frac{A^2 T_b}{6 N^3} \sum_{i=1}^{K-1} r_{i,0}} \quad (5.38)$$

Así pues, teniendo en cuenta que la modulación empleada es BPSK la probabilidad de error de bit puede ser calculada a partir de:

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{A^2 T_b}{N'_0 + \frac{A^2 T_b}{6 N^3} \sum_{i=1}^{K-1} r_{i,0}}} \right) \quad (5.39)$$

11 Diversidad de Handoff

En IS-95 CDMA cuando un móvil en funcionamiento está retirándose de la cobertura de una estación base o sector, a otra, experimenta varios procesos. Uno de estos procesos es el handoff. El móvil siempre esta rastreando todas las posibles señales piloto de estaciones bases.

Supongamos que el móvil recibe una señal fuerte y clara de la estación base 'A'. Luego el móvil en movimiento comienza a recibir una señal de una estación base 'B'. Esta señal si sobrepasa una umbralización entonces es un candidato para ser utilizada. Esta umbralización la llamamos 'add threshold'. Luego si la señal de la

estación 'B' excede en un margen a la señal de la estación 'A', entonces la señal de la estación 'B' comienza a procesar la llamada. En ese momento recibe ambas señales, las cuales son combinadas para tener una mejor comunicación. Una vez que la señal de la estación 'A' disminuye a tal punto que cruza una umbralización llamada 'drop threshold', entonces empieza a funcionar un reloj. Si el reloj expira entonces deja de procesar esa señal, pero si repentinamente aumenta la señal antes de que expire el reloj a tal punto que sobrepase el 'drop threshold' entonces sigue siendo utilizándose.

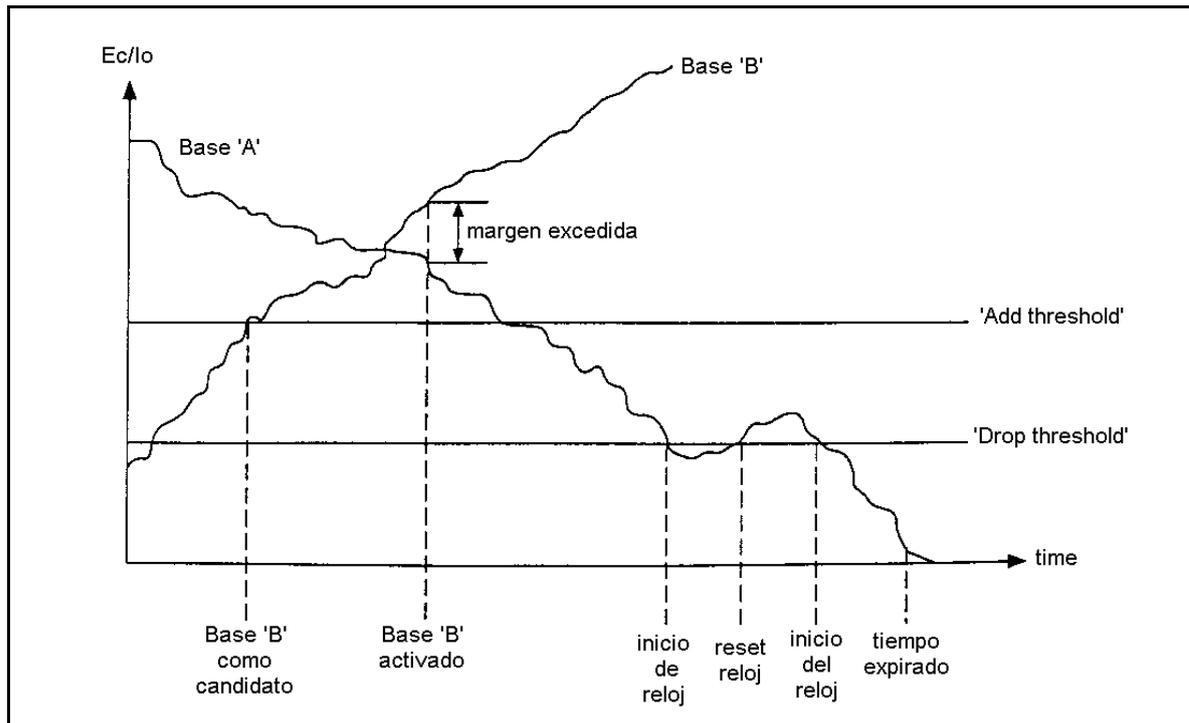


Figura 5. 23 - Handoff

Para CDMA se permite recibir las transmisiones de 3 estaciones bases simultáneamente como máximo, logrando minimizar los disturbios en la voz o datos en un handoff.

Hay 3 tipos de handoff:

Soft Handoff: Ocurre cuando la señal de la nueva estación base, se comunica sin perder la comunicación de la señal del anterior estación base. Pero deben pertenecer a la misma portadora. Este método tiene muchas ventajas, ya

que el contacto con la nueva estación base se hace antes de perder la señal de la anterior estación base.

Softer Handoff: Es un soft handoff, pero entre sectores de la misma celda, no obstante las estaciones bases ó sectores son distinguidos por su desplazamiento de la secuencias cortas (PN). Es como si en una celda pusiéramos varias estaciones bases para diferentes sectores.

Hard Handoff: Es el cambio del canal de una portadora a un canal de otra portadora, de diferentes estaciones bases. Este cambio es necesario debido por el abarrotamiento de usuarios en la misma portadora.

12 Receptor Rake

El Receptor Rake tiene la función de recibir, detectar y medir los parámetros de diferentes señales, que pueden ser utilizadas para la recepción. Esto ayuda al proceso de soft handoff y al mejoramiento de la fidelidad de la señal con la combinación de señales.

Por otro lado la señal puede experimentar el fenómeno de multicamino, es decir, múltiples trayectos que recorre la señal hacia el receptor, recepcionando este varias versiones de la misma señal con diferentes retardos.

El bloque de 'searcher receiver' puede detectar las señales más potentes (supongamos 'L' el número de las señales) entre las estaciones bases y sus multicaminos. De tal manera que provee el tiempo de cada señal encontrada. Ahora si la diferencia de tiempos encontrados es menor que el T_c , entonces estas señales pertenecen a la misma estación base, por lo que son señales multicamino; pero si la diferencia de tiempos es mayor que T_c , entonces corresponden a diferentes estaciones bases. Por eso el 'searcher receiver' llena una tabla donde se encuentran los tiempos de las señales multicamino con su respectiva estación base.

Cada brazo del Receptor Rake captura únicamente la energía proveniente del camino de propagación asociado a su retardo de una estación base, mientras que el resto de caminos los percibe como interferentes. En consecuencia, el receptor lo que hace es utilizar constructivamente las señales de cada componente multicamino y combinarlas para efectuar la decisión del símbolo que se haya transmitido.

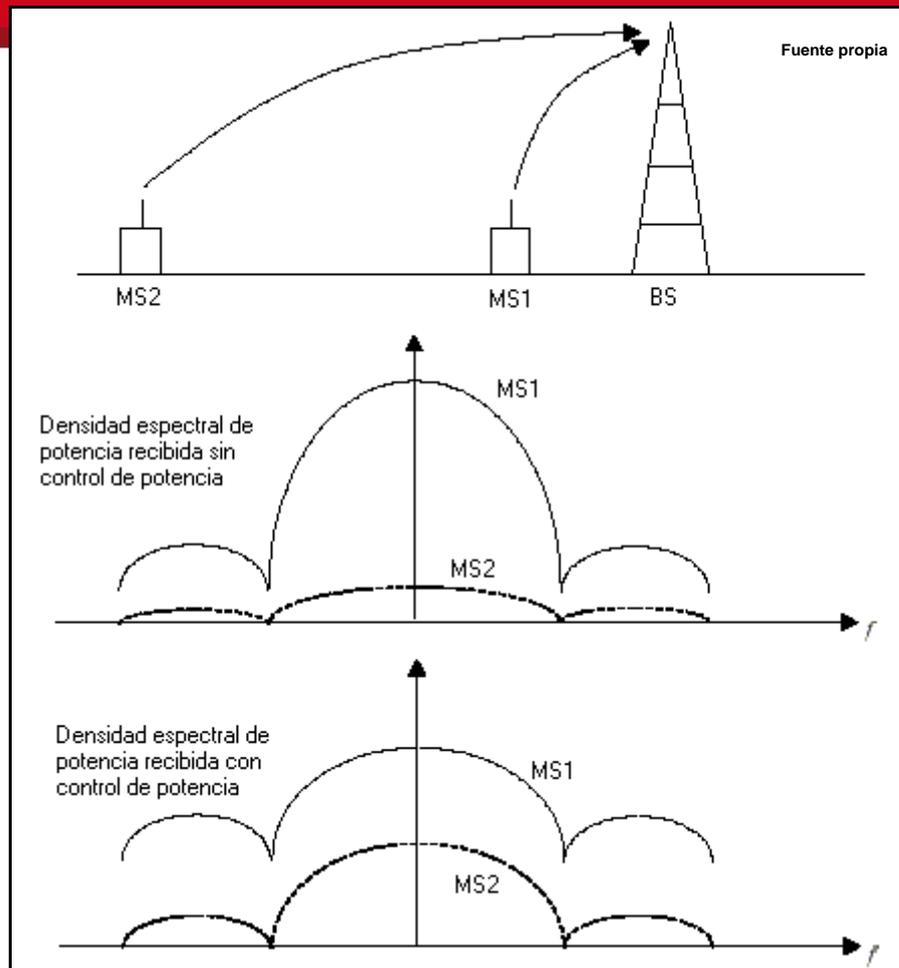


Figura 5. 25 – Control de potencia

Existen esencialmente dos posibilidades para llevar a cabo el control de potencia:

13.1 Lazo Abierto

Consiste en que los terminales ajusten, por sí mismos el nivel de potencia transmitido en función de la medida de potencia, que efectúan de una cierta señal piloto (canal piloto) enviada por la base en el enlace descendente con una potencia conocida. La principal ventaja de esta técnica radica en que no es necesario que cada terminal disponga de un canal dedicado en el enlace descendente, sino que basta con un único canal común que transmita la señal piloto. Por el contrario, el gran problema consiste en que las pérdidas de propagación en los enlaces ascendente y descendente no son iguales cuando trabajan a frecuencias diferentes, debido a la variación rápida del canal originado por la propagación multicamino. Por este motivo, mediante esta técnica únicamente es posible compensar las variaciones lentas del canal, lo que puede

originar en un momento dado diferencias sustanciales en la potencia proveniente de cada terminal.

$$\text{Potencia recibida por la estación base} = \text{Potencia del móvil} - \text{Perdidas en Reverse Link} \quad (5.40)$$

$$\text{Potencia recibida por la estación móvil} = \text{Potencia de la estación base} - \text{Perdidas en Forward Link} \quad (5.41)$$

En el móvil la Potencia de la estación base (dB) es conocida. La estación móvil o simplemente móvil recibe una potencia en dB en su receptor. Por lo tanto puede calcular las pérdidas ocasionadas en el enlace inverso (Reverse Link).

Asume: Perdidas en el enlace directo (Forward Link) (dB) = Perdidas en el enlace inverso (Reverse Link) (dB).

Por último, el móvil transmitirá con la potencia adecuada para que la estación base reciba la potencia requerida.

13.2 Lazo Cerrado

Mediante esta estrategia, cada terminal recibe en el canal de tráfico del enlace descendente, a través de una multiplexación, el bit de control de potencia. Este bit si es '0' notifica que debe incrementar, pero si el bit es '1' indica que debe reducir la potencia en función del nivel con que ha sido recibido en su última transmisión. De este modo, y a diferencia del caso en lazo abierto, ahora el control se efectúa partiendo de las pérdidas realmente observadas en el propio enlace ascendente, lo que permite compensar adecuadamente los desvanecimientos rápidos del canal móvil y por lo tanto garantiza mucho más un nivel similar de potencia para cada terminal. Los aspectos a diseñar apropiadamente para llevar a cabo este tipo de control son, por un lado, la periodicidad con la que se llevan a cabo los cambios de potencia, y que debe ser más rápida que las variaciones del canal, y por otro lado el nivel de incremento que corresponde a cada actualización de potencia, y que deberá tener presente la profundidad de los desvanecimientos.

La velocidad de transmisión de los datos antes de insertar el bit de control de potencia es de 19.2 Kbps y su respectiva trama es de 20 ms.. La frecuencia de la inserción del bit es de 800 Hz., es decir, cada 1.25 ms.. Por lo tanto en cada 24 bits se insertará el bit de control. En este intervalo de tiempo (1.25 ms.) los 16

primeros bits pueden ser posibles bits de control; la posición lo determina los 4 últimos bits del anterior intervalo de 1.25 ms., siendo el 24° posición el bit más significativo y el 21° el menos significativo.

Las posiciones 17° al 24° nunca serán bits de control.

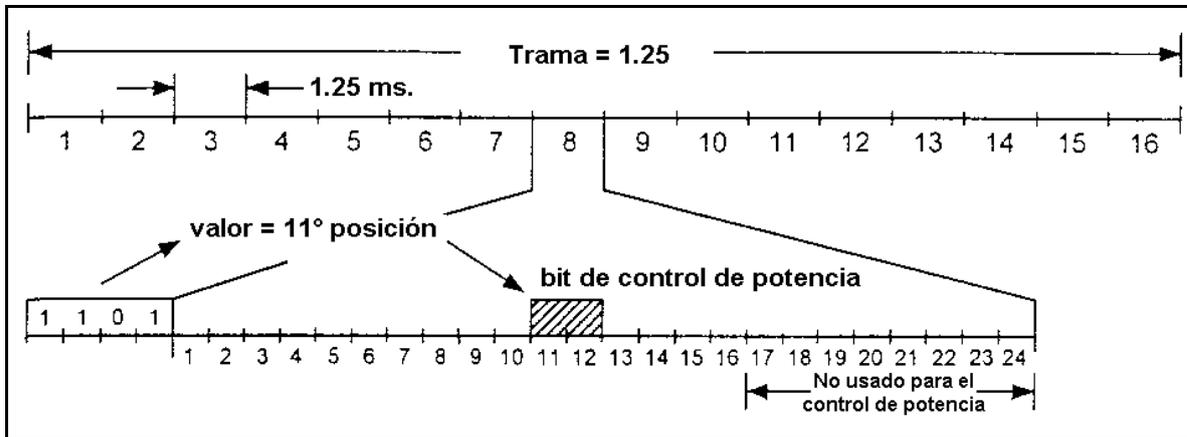


Figura 5. 26 – Tramas de Control⁴

14 Reuso de frecuencia

Históricamente, desde la introducción de los sistemas de acceso CDMA, se han llevado a cabo numerosos estudios comparativos de capacidad con respecto de la técnica de acceso por división en tiempo TDMA. Sin embargo, en el caso de considerar una célula o celda aislada, el gran ancho de banda requerido por CDMA en general no compensa en términos de eficiencia medida en usuarios por Km^2 / Hz a los sistemas TDMA. Por el contrario, es al considerar un entorno celular cuando surgen los verdaderos beneficios de un sistema de acceso CDMA.

En concreto, el aspecto más importante de CDMA frente a TDMA en un entorno constituido por diferentes células radica en la posibilidad de efectuar un reuso frecuencial total, esto es, emplear la misma banda de frecuencias en todas las células existentes en el sistema, gracias a que CDMA permite que usuarios diferentes hagan uso de la misma frecuencia para transmitir. Por el contrario, en los sistemas TDMA, la existencia de celdas vecinas que trabajaran con la misma frecuencia daría lugar a situaciones de elevada interferencia que degradarían la transmisión, por lo que es preciso definir patrones de reuso del espectro en función del radio de las celdas empleadas, lo que conduce a la definición de conjuntos de células ó clusters en los que cada célula emplea frecuencias diferentes.

⁴ Fuente de CDMA systems engineering handbook escrito por Lee, Jhong Sam

Consecuentemente, la necesidad de reutilizar el espectro respetando unos ciertos límites de distancia reduce sustancialmente la eficiencia de un esquema TDMA respecto de uno CDMA que es capaz de efectuar un reuso completo.

En cualquier caso, debe puntualizarse que la consideración de un esquema CDMA en un entorno celular implica que deban tenerse en cuenta en el receptor de una cierta estación base dos contribuciones a la interferencia total, como son la interferencia intracelular y la interferencia intercelular. Si bien la primera corresponde a un término para que mediante el control de potencia se puede garantizar que todos los usuarios contribuyan con el mismo nivel, al considerar la interferencia intercelular esto no es así pues son las celdas vecinas quienes efectúan el control de potencia de las transmisiones que originan esta interferencia. Por este motivo, la contribución de la interferencia intercelular depende en cada caso de las condiciones de propagación existentes así como del número de usuarios que transmita en cada una de las celdas. A este respecto, se han efectuado también numerosos estudios en los que se modela la contribución de las celdas vecinas sobre la interferencia total como una cierta fracción f de la interferencia intracelular, donde f depende de las condiciones de propagación consideradas.

Análogamente, otra de las ventajas de DS/CDMA en un contexto celular se basa en que, gracias al reuso frecuencial total, es posible que terminales que se encuentren en la región fronteriza entre diferentes celdas sean servidos simultáneamente por dichas celdas. Así, las señales recibidas se combinan dando lugar a una mejora por diversidad en términos de la relación señal a interferente total. Desde el punto de vista de traspasos ó handoff, esta característica permite el llamado soft handoff por el que un terminal que se aleje de una base y se acerque a otra pueda combinar durante un tiempo la señal transmitida por ambas, dando lugar a una transición progresiva entre las dos celdas. El caso particular en que esta transición se lleve a cabo entre sectores de una misma base se conoce como softer handoff.

15 Codificación del canal de Voz

El codificador de razón variable extendido "The Enhanced Variable Rate Coder (EVRC)", es un codificador de voz en CDMA compatible con la tecnología utilizada en la actualidad, que promete la optimización necesaria para permitir una alta calidad de voz y mayores niveles de capacidad. EVRC, estandarizado recientemente como IS-127, se apoya de la tecnología actual de software y

hardware para ofrecer comunicación de voz de alta calidad a bajas tasas de bit. Las transmisiones de voz de alta calidad prometen mejorar la satisfacción del cliente, mientras que las bajas tasas de bit reducen el ruido del sistema, incrementa la capacidad del sistema y últimamente han bajado los costos de operación por suscriptor. Ahora, como un estándar internacional aprobado, EVRC también ofrece estabilidad a proveedores en servicio de comunicaciones, interoperabilidad y desarrollo de tiempo de prueba.

El codificador original de voz en CDMA, IS-96A, era un diseño excitado por un Code-Excited Linear Predictive (CELP). IS-96A transmite 8kbps de información de voz a 9.6kbps cuando se le agrega la corrección de error. El deseo por mejorar la calidad de voz hizo que la TIA "Telecommunications Industry Association" empezara a trabajar en un vocoder (CELP) a 13 kbps el cual provee una más alta calidad en la transmisión de voz. El vocoder en CDMA de 13 kbps utiliza una tasa de bit más alta para mejorar dicha calidad de voz, sin embargo, la mejora de la misma reduce la capacidad del sistema y el área de cobertura de la célula.

TIA, trabajando con QUALCOMM, inició un proyecto sobre un codificador cuya calidad fuese igual o mejor que la del codificador de 13kbps, ofreciendo mayor capacidad a los sistemas. El resultado fue el IS-127 EVRC, el cual, similar a los dos anteriores es un codificador de tasa variable, el cual apoyando de técnicas de hardware y software más modernas logra una calidad de voz de 13kbps a una tasa de 8kbps.

Un sistema EVRC de 8kbps, usando el mismo número de sitios de célula, ofrece el doble de la capacidad que los sistemas de 13 kbps o alternativamente la misma capacidad para la mitad de células. Básicamente, el hecho de tener menos bits implica menor ruido en el sistema y mejor aprovechamiento del ancho de banda, dando como resultado el poder ofrecer a los suscriptores calidad de línea alambrada a un menor costo.

El secreto del EVRC es un algoritmo llamado "Relaxed Code- Excited Linear Predictive coding(RCELP)", que se desarrolló en 1994 por Bell Labs y Lucent's research. Una generalización del algoritmo de la codificación de voz CELP es RCELP el cual es idóneo para operaciones de tasa variable y fortalecer el ambiente de CDMA. CELP utiliza tramas de voz de 20 ms para la codificación y decodificación. Cada intervalo de tiempo de 20 ms, el codificador procesa 160 muestras de voz. Los codificadores de tasa variable examinan el contenido de la

trama y determinan la tasa de codificación necesaria. De acuerdo al nivel de la complejidad de la señal detectada, el codificador analiza la voz a cuatro diferentes tasas de bit: 8kbps, 4kbps, 2kbps o 1kbps. Esto difiere de otros codificadores (half rate y multi rate coders), donde la tasa de bit se determina una vez por llamada. Los codificadores de tasa variable emplean un algoritmo conocido como detección de actividad de voz. El vocoder codifica a tasas de bit altas al detectar actividad de voz, generando con esto una mejor calidad de la misma y al no haber detección de voz, el vocoder reduce la tasa de codificación y la tasa de transmisión efectiva disminuye de 9600bps a 1200bps. El transmisor genera un octavo de la energía de interferencia y utiliza un octavo del espectro de una transmisión al 100%.

Los vocoders también incrementan la calidad en la voz mediante la supresión del ruido de fondo. Cualquier ruido que sea constante en la naturaleza, tal como el ruido del camino, es atenuado. El constante sonido de fondo se interpreta por el vocoder como ruido que no contiene información relevante, por lo que se remueve tanto como sea posible. Esto mejora la claridad de la voz en ambientes ruidosos, tal como en el interior de los coches o en lugares donde hay mucha gente.

Para cada trama de 20 ms, el algoritmo CELP examina los datos y genera 10 coeficientes lineales del filtro de codificación de predicción. Los coeficientes se representan con la precisión 4 -, 2 -, o 1-bit, dependiendo de la tasa variable determinada por el factor de complejidad. Estos coeficientes describen la forma de onda de excitación, un predictor derivado de un modelo matemático de los pulmones humanos y de las cuerdas vocales, y otro predictor de corto plazo con factor de periodicidad y ganancia derivado de un modelo similar a la zona vocal. La forma de onda de excitación para cada 5 ms se selecciona de un código que consiste en una señal formada por una gran cantidad de vectores candidatos. El vector de código seleccionado para diseñar los filtros minimiza el error entre la voz original y la sintetizada.

A diferencia con el CELP, el RCELP no pretende generar la voz original exactamente, acopla una versión en el tiempo de la señal residual para conformar un contorno de tono simplificado el cual se obtiene mediante la estimación de retraso de tono en cada trama y linealmente usando interpolación de tono de trama a trama resultando en una mayor calidad de voz por bit transmitido. La representación del tono simplificado deja más bits disponibles en cada paquete para la excitación estocástica y para la protección de perjuicios al canal que sería

posible si se usara una aproximación de tono fraccional tradicional. El resultado es la prevención de errores mejorado sin la reducción de la calidad de la voz.

16 MOS

El MOS es una medida de la Calidad de Voz, con el siguiente rango:

MOS	Calidad
5	Excelente
4	Buena
3	Aceptable
2	Pobre
1	Mala

Tabla 5. 1

El MOS⁵ es subjetivo y se calcula a partir de los parámetros:

- Jitter
- Latencia
- Pérdida de Paquetes

Se considera:

- Aceptable: MOS $\geq 3,6$ y
- Bueno: MOS ≥ 4 .

Algunos estándares de compresión:

Método de compresión	Kbps	MOS
PCM	64	4.4
ADPCM	32	4.2
LPC-10	2.4	2.5
CELP	4.8	3.0
LD-CELP	16	4.2
ACELP	5.3	3.5
CS-ACELP	8	4.2

Tabla 5. 2

⁵ Las medidas de MOS (Mean Opinion Score) son especificadas por el ITU-T

CAPITULO 6.- IMPLEMENTACIÓN Y SIMULACIONES

1 Algoritmo del estándar IS-95 CDMA

El desarrollo de la simulación del enlace descendente (downlink) del sistema de telefonía móvil celular CDMA, se ha desarrollado empleando el lenguaje de programación del paquete matemático **Matlab**, el cual se compone de una serie de módulos que interactúan entre si para llegar al resultado deseado.

En el diagrama de flujo de la figura 6.1 corresponde a los procesos principales empleados para realizar la simulación de la modulación y canal del IS-95, de tal forma que al ingresar una señal de voz cualquiera, se procesa como si se modulara y pasara por el canal radio, obteniéndose una señal de voz similar a la anterior.

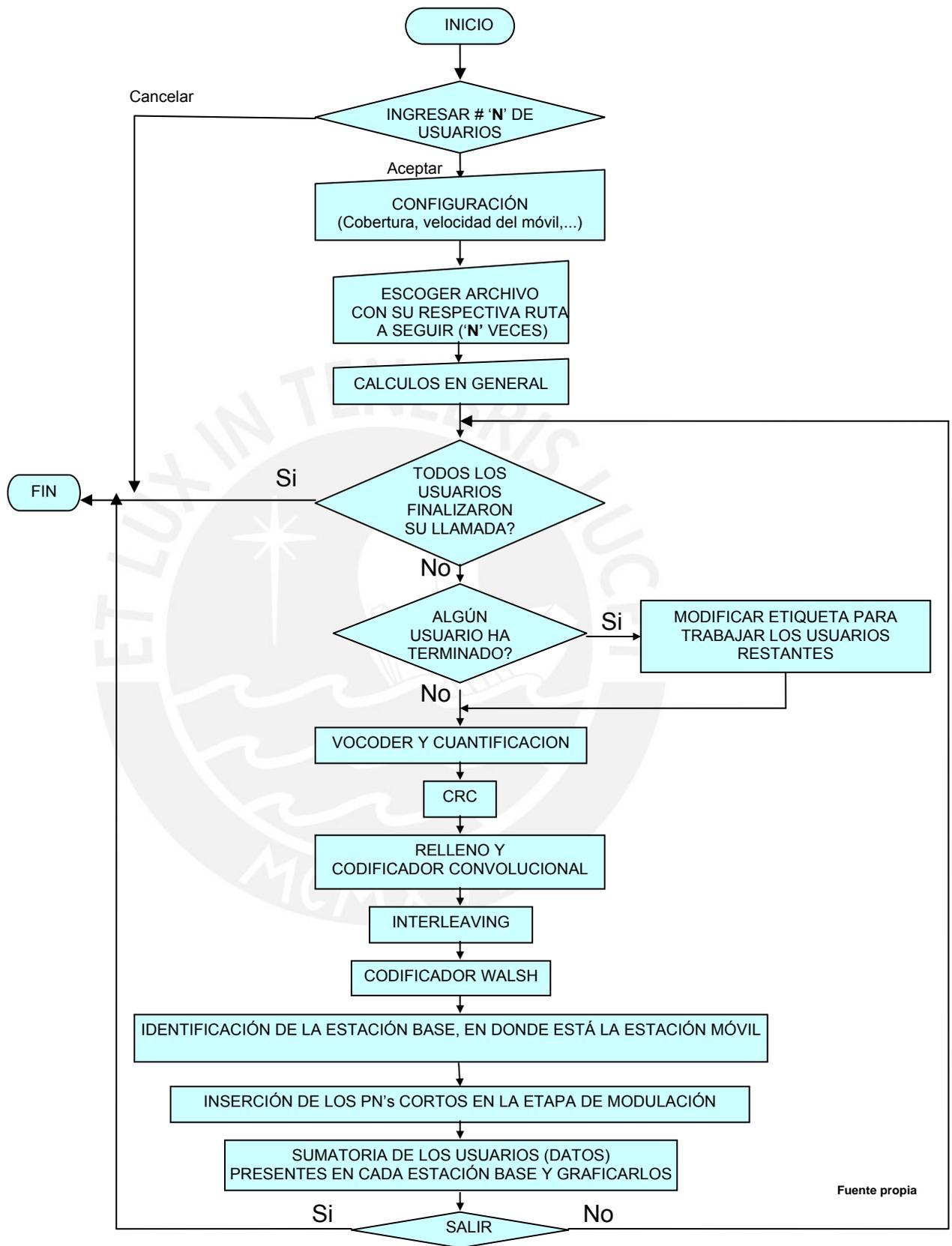
Los bloques son los siguientes:

- **INGRESAR # 'N' DE USUARIOS** muestra un menú donde puede escoger la cantidad de usuarios que va a simular el sistema. También le proporciona la alternativa de seguir o cancelar el programa.
- **CONFIGURACIÓN**, usted puede escoger la velocidad del móvil (usuario), el radio de la cobertura de una estación base y opciones para la transmisión.
- **ESCOGER ARCHIVO CON SU RESPECTIVA RUTA A SEGUIR ('N' VECES)**, usted elegirá el archivo de voz y la ruta o camino que va a seguir cada usuario
- **CÁLCULOS EN GENERAL** permite hacer algunos cálculos de la cantidad de tramas de cada usuario según la opción que se haya escogido.

Se inicializan contadores y luego, entra en un lazo para graficar la potencia de cada usuario en cada trama.

- **TODOS LOS USUARIOS FINALIZARON SU LLAMADA?** verifica si terminaron de graficar todas las tramas de cada usuario.

Diagrama de bloques.-



Fuente propia

Figura 6. 1 – Diagrama de bloques del proceso del CDMA

- **ALGÚN USUARIO HA TERMINADO? y MODIFICAR ETIQUETA PARA TRABAJAR LOS USUARIOS RESTANTES** tienen la tarea de modificar etiquetas para tener conocimiento de la finalización de alguna ó algunas transmisiones.
- **VOCODER Y CUANTIFICACIÓN** es un codificador de voz el cual utiliza un simple LPC (Linear Predictive Codec) de 19 polos, los cuales son cuantificados en 8 bits, más un bit para el signo. A la resultante se le agrega un bit para generar una trama de 172 bits.
- Luego entra en el proceso de **Chequeo de Redundancia Cíclica (CRC)**, donde se genera 12 bits por cada trama, para que el receptor verifique si la trama llegó bien. La resultante del bloque de CRC contiene 184 bits.
- **RELLENO Y CODIFICADOR CONVOLUCIONAL** donde se agrega 8 bits con valor cero lógico a la trama. Esta adhesión de bits es esencial porque la etapa del codificador convolucional trabaja ó procesa en un paquete de 9 bits, alimentándose bit por bit. Por lo tanto la adhesión de estos bits sirve para que no encadene los datos, logrando la autonomía de cada trama. Adicionalmente, el codificador convolucional realiza dos operaciones en paralelo. De cada operación se genera un bit. Es decir, se genera 2 bits por cada bit entrante al codificador convolucional. La trama resultante de esta etapa sería de 384 bits.
- **EI ENTRELAZADO (INTERLEAVING)** es el entrelazamiento de los bits. Esta etapa es útil cuando haya una secuencia de bits errados en la transmisión de la información; de tal manera que estos errados bits estén distribuidos por toda la trama. Estadísticamente, con este mecanismo se puede mejorar la percepción de la voz, ya que mejor es escuchar la voz con pequeños tramos errados, que una porción de la voz perdida.
- **EI CODIFICADOR WALSH** es el encargado de generar 64 bits de un bit. Estos códigos de 64 bits son ortogonales, por lo tanto es posible la identificación de cada usuario.
- **IDENTIFICACIÓN DE LA ESTACIÓN BASE, EN DONDE ESTÁ LA ESTACIÓN MÓVIL** tiene la finalidad de calcular la nueva ubicación,

interpolando los puntos trazados de cada usuario, e identificar en cuál estación base está.

- **INSERCIÓN DE LOS PN's CORTOS EN LA ETAPA DE MODULACIÓN QPSK** realiza la tarea de inserción de la secuencia pseudoaleatoria corta con un determinado desplazamiento. La secuencia pseudoaleatoria representa la identificación de la estación base en donde está funcionando. Si esta secuencia se autocorrelaciona, el resultado es casi cero.

- **SUMATORIA DE LOS USUARIOS (DATOS) PRESENTES EN CADA ESTACIÓN BASE Y GRAFICARLOS:**
 - Se procede a la suma vectorial de las tramas de los usuarios pertenecientes a cada estación base.
 - Se determina en cual celda esta cada usuario.
 - Se calcula las perdidas en el espacio libre de cada uno.
 - Se calcula la potencia recibida de cada uno.
 - Se grafica la potencia del o de los usuarios.
 - Cada cierto tiempo, las gráficas muestran la potencia recibida de cada usuario.

1.1 Bloques más importantes

A continuación se muestra el flujograma de los boques más importantes

- **ESCOGER ARCHIVO CON SU RESPECTIVA RUTA A SEGUIR ('N' VECES)**

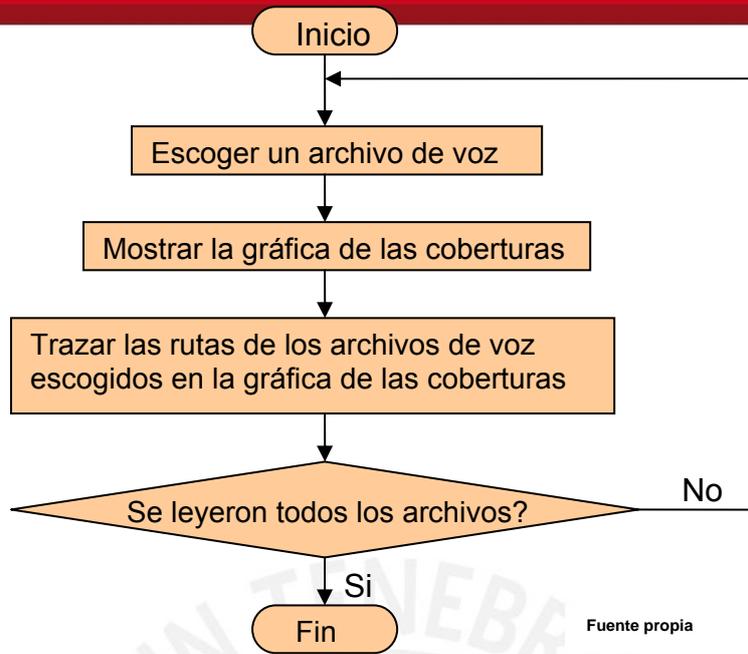


Figura 6. 2 – bloque: **ESCOGER ARCHIVO CON SU RESPECTIVA RUTA A SEGUIR ('N' VECES)**

○ **CÁLCULOS EN GENERAL**

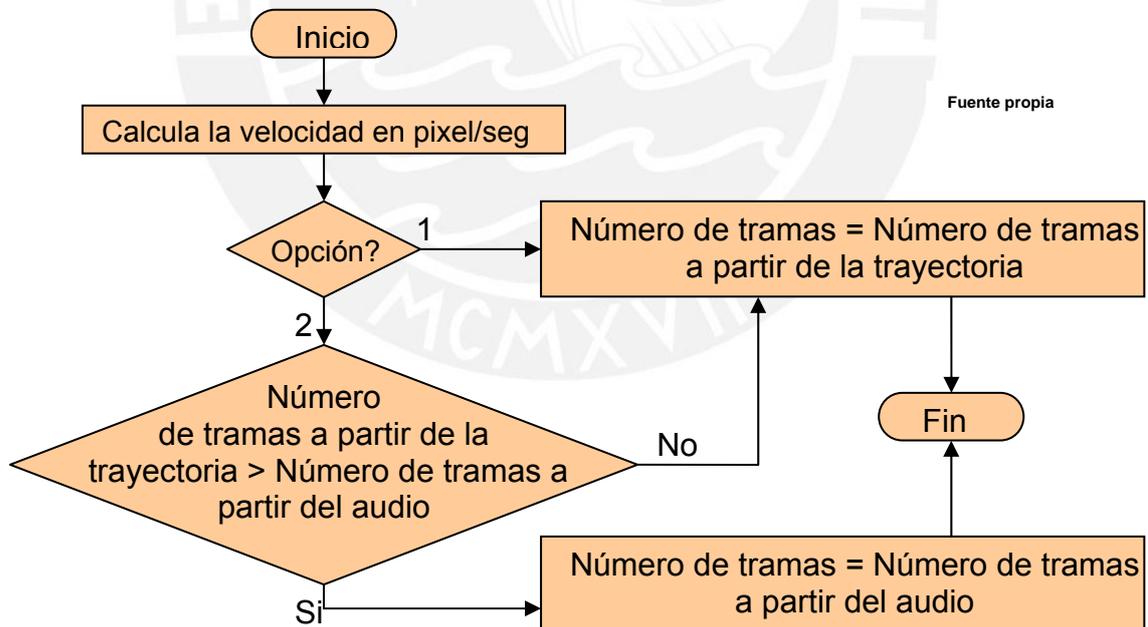
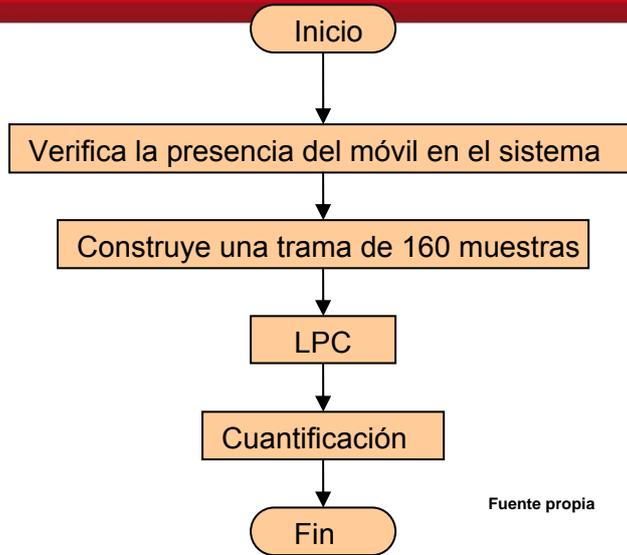


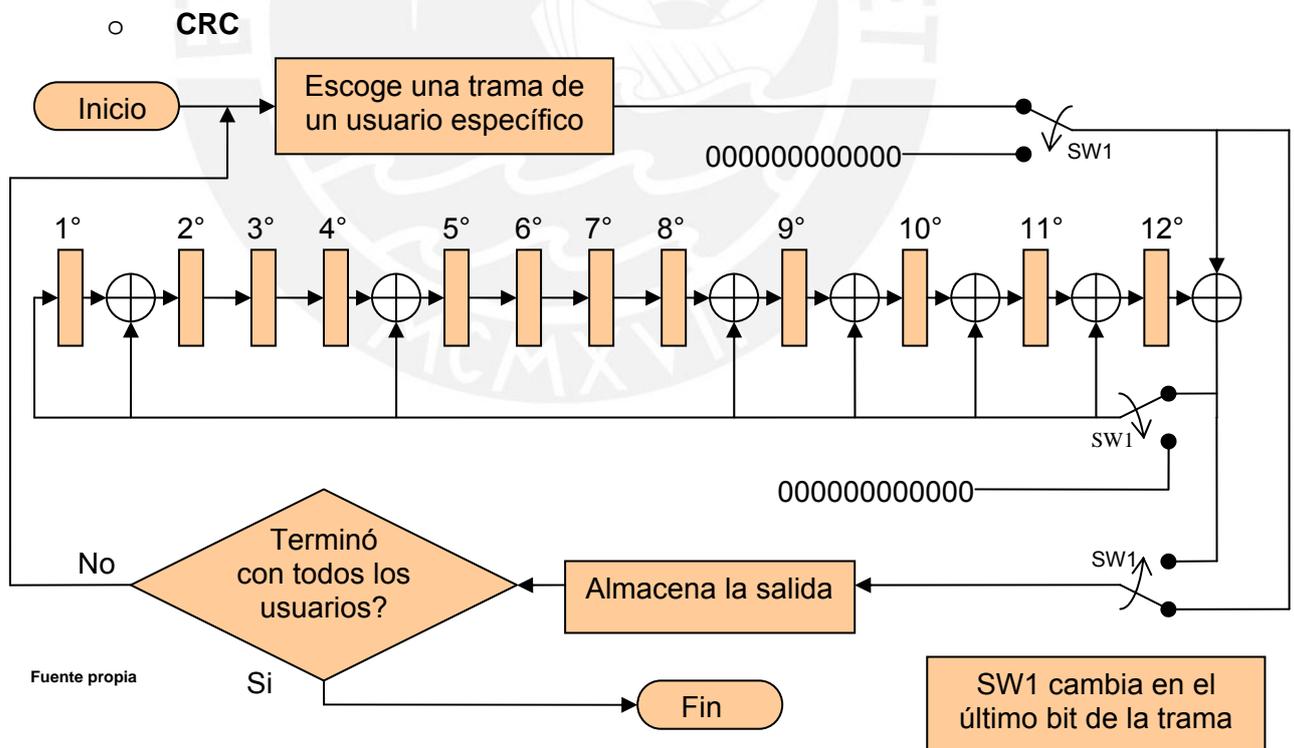
Figura 6. 3 – bloque: **CÁLCULOS EN GENERAL**

○ **VOCODER Y CUANTIFICACIÓN**



Fuente propia

Figura 6. 4 – bloque: VOCODER Y CUANTIFICACIÓN



Fuente propia

Figura 6. 5 – bloque: CRC

o RELLENO Y CODIFICADOR CONVOLUCIONAL

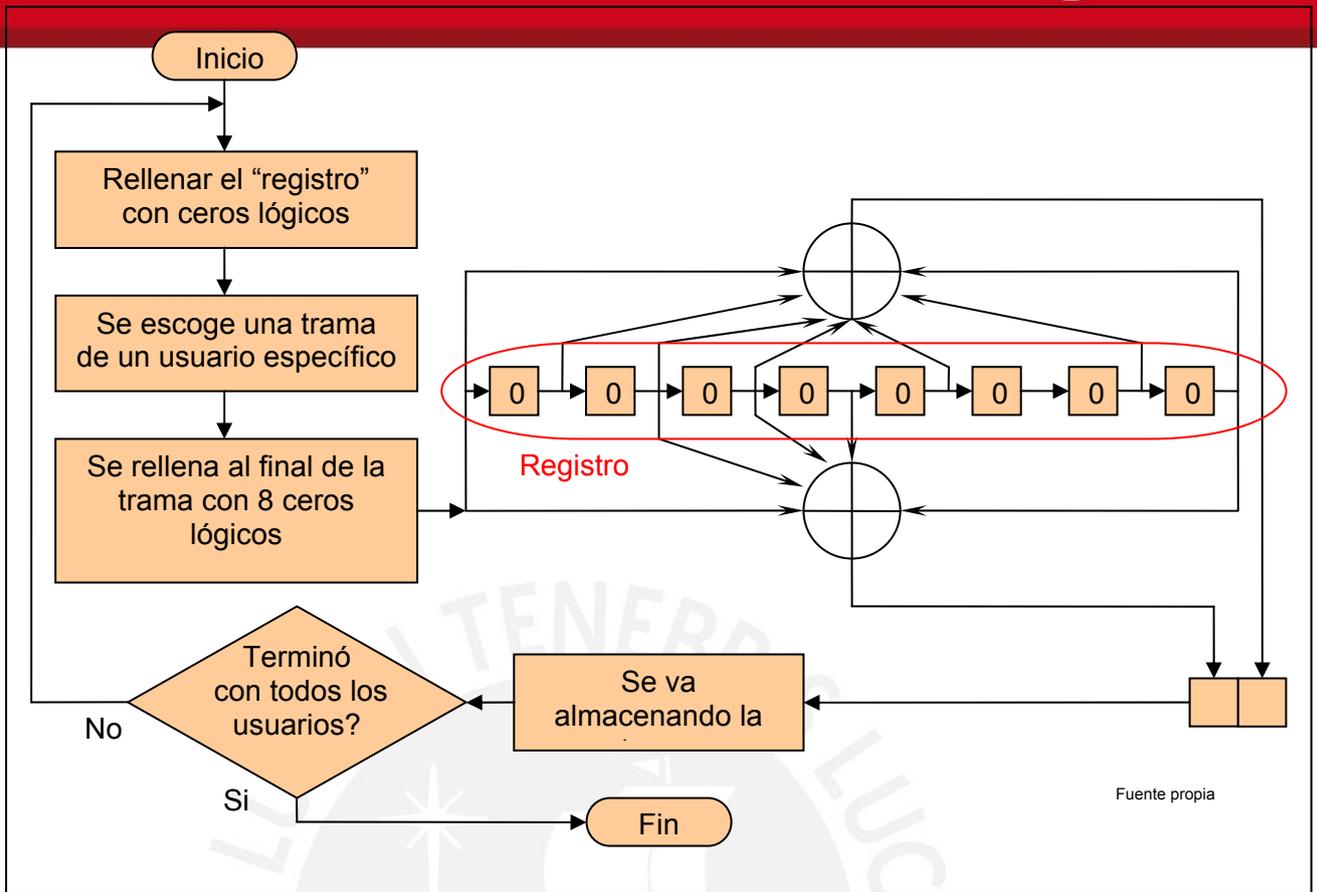


Figura 6. 6 – bloque: RELLENO Y CODIFICADOR CONVOLUCIONAL

○ IDENTIFICACIÓN DE LA ESTACIÓN BASE, EN DONDE ESTÁ LA ESTACIÓN MÓVIL

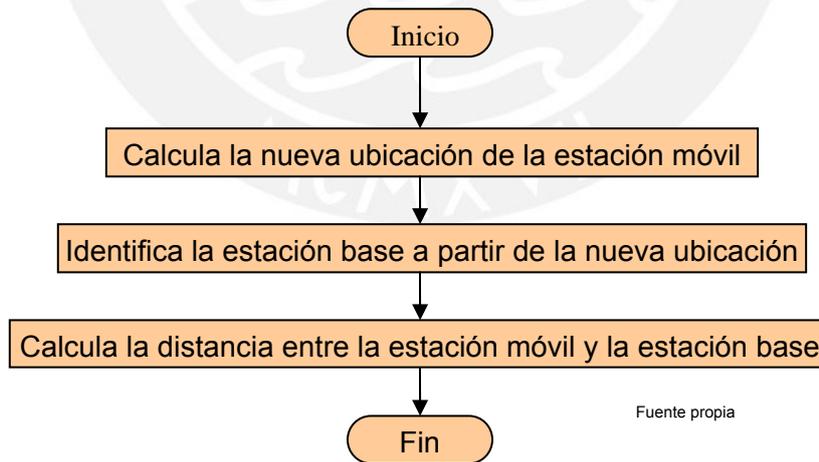


Figura 6. 7 – bloque: IDENTIFICACIÓN DE LA ESTACIÓN BASE EN DONDE ESTÁ LA ESTACIÓN MÓVIL

○ SUMATORIA DE LOS USUARIOS (DATOS) PRESENTES EN CADA ESTACIÓN BASE Y GRAFICARLOS

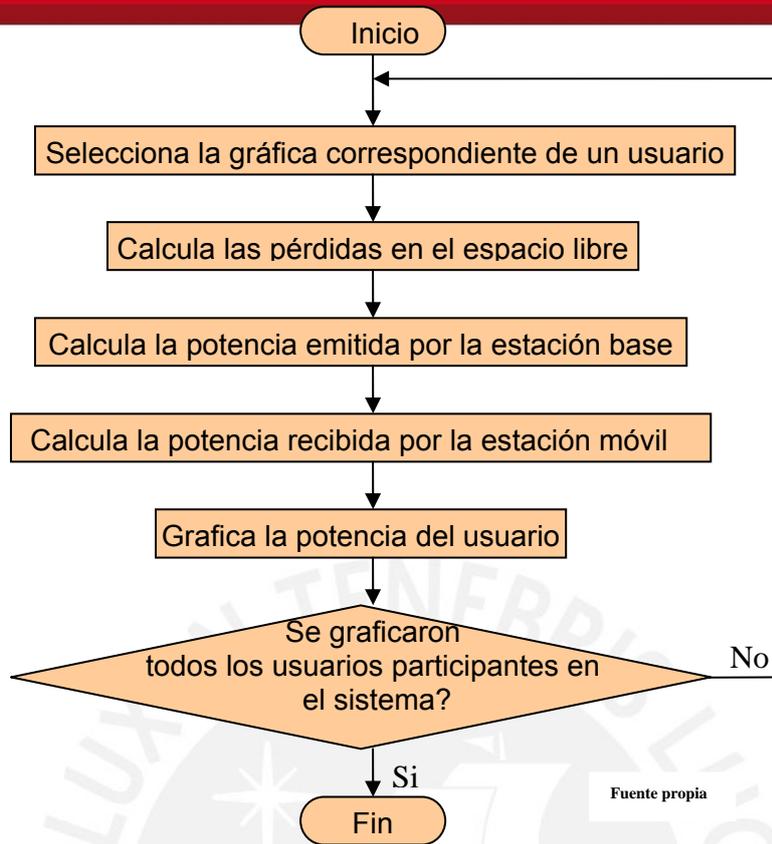


Figura 6. 8 – bloque: SUMATORIA DE LOS USUARIOS (DATOS) PRESENTES EN CADA ESTACIÓN BASE Y GRAFICARLOS

2 Programas en Matlab

El programa en Matlab está conformado por varias funciones o subprogramas. También utiliza el archivo "secycod.mat", en el cual se almacenan las secuencias pseudoaleatorias cortas y los códigos Hademark's o Walsh's.

El programa principal que grafica todas las potencias de los usuarios presentes en el sistema tiene como nombre "CDMA.m" (Anexo B)

Para verificar los resultados obtenidos, se implementó otro programa similar que en vez de mostrar las potencias en gráficas, los almacena en variables, para ser después recuperados con otro programa. El programa en mención se llama "CDMA1.m" (Anexo C), el cual no es tan extenso como "CDMA.m", ya que no tiene la interface gráfica.

"CDMA1.m" utiliza las mismas funciones o subprogramas que el programa "CDMA.m". Adicionalmente, al igual que el "CDMA.m", se escoge la cantidad de usuarios, los archivos de voz y las rutas a seguir. Este programa se demora un poco más, porque va almacenando cada trama.

Luego de que termine de ejecutar el programa "CDMA1.m" entonces se ejecuta el programa "recupera.m" (Anexo C), el cual se encarga de recuperar el archivo de voz, según el numero de orden del usuario que se escoge recuperar. Puede ejecutar "recupera.m" cuantas veces quiera para recuperar cualquier archivo de voz.

El programa "recupera.m" está conformado por 6 funciones que trabajan en su totalidad el archivo de voz, a diferencia con los programas "CDMA.m" y "CDMA1.m" que trabajan cada trama.

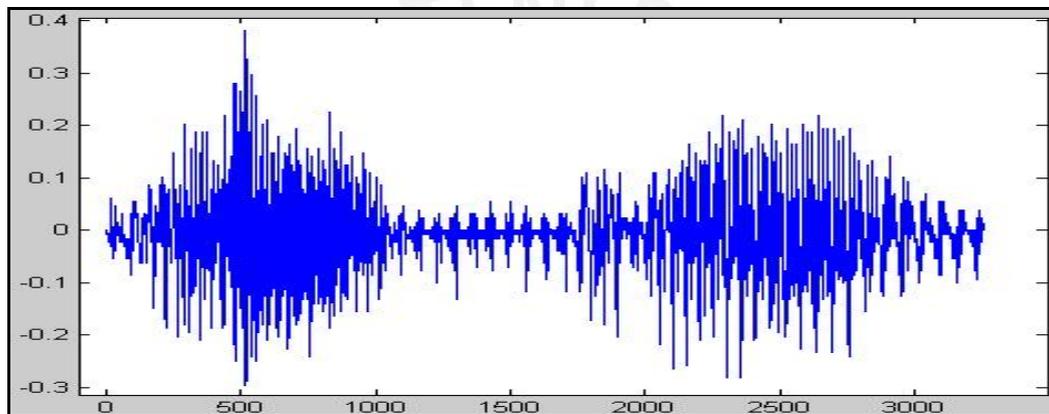
3 Pérdidas en las señales de voz

La degradación de la voz es causada por el vocoder y la cuantificación. El codificador de voz o vocoder es un LPC (Linear Predictive Codec) de 19 polos. Debió haberse operado con una cantidad mayor de polos como 25, pero por motivos de espacio para que alcanzara en la trama de bits se trabajó una cantidad

menor. También estaba relacionada con la cantidad de bits de la cuantificación, en este caso se trabajó con 9 bits. Teniendo en cuenta que mientras mayor cantidad de bits es un número más exacto, aunque el pequeño inconveniente es que mientras más bits de cuantificación menos polos.

A continuación se mostrará la gráfica de un archivo de voz (Figura 6. 9). En este archivo de voz está la palabra “cuatro”. Luego se verá otra gráfica (Figura 6. 10) donde la voz está codificada con el LPC mencionado. Y por último se presentará la gráfica (Figura 6. 11) donde la codificación es cuantificada con 9 bits de resolución.

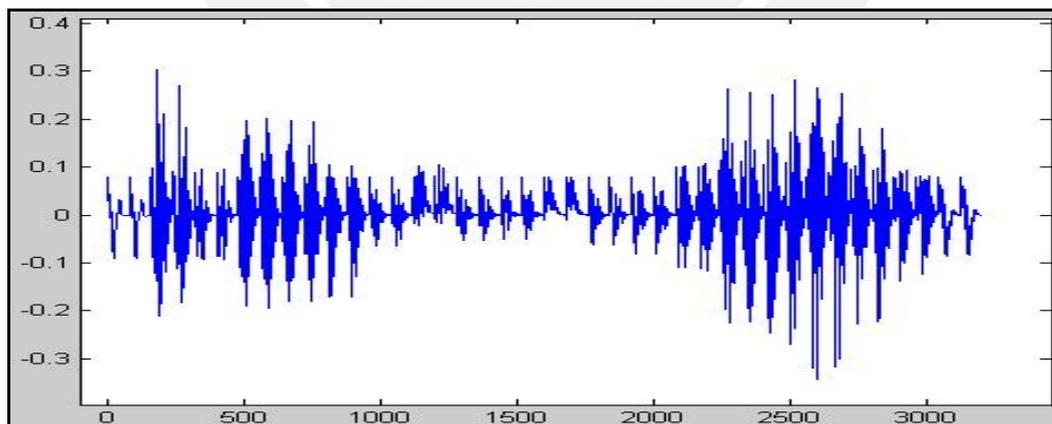
Gráfica de voz:



Fuente propia

Figura 6. 9 – Gráfica de la voz

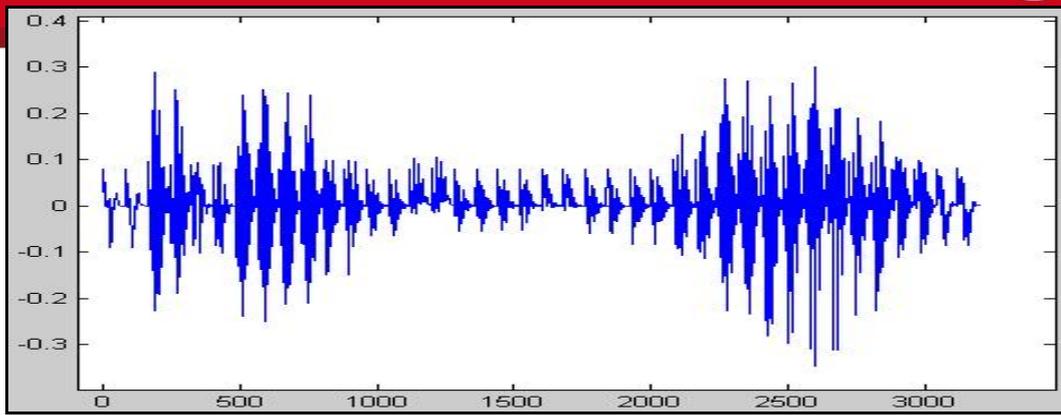
Gráfica de la codificación:



Fuente propia

Figura 6. 10 – Voz codificada

Gráfica de la cuantificación:



Fuente propia

Figura 6. 11 – Voz Cuantificada

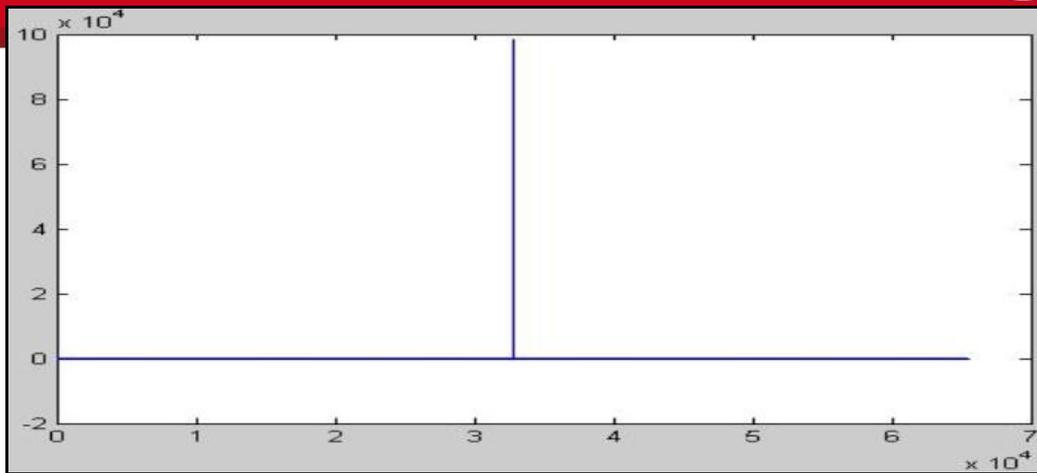
4 Resultados de las psecuencias pseudoaleatorias correlacionadas

Ahora nos referiremos a la secuencia pseudoaleatoria corta, la cual se usa para identificar a cada estación base, debido al desplazamiento de esta secuencia en el tiempo para cada estación.

La secuencia pseudoaleatoria es periódica, a pesar de su nombre ‘pseudoaleatoria’, pero debido a su tamaño se podría considerar que es “tan grande” que puede ser aleatoria. El periodo de esta secuencia es 26.666 ms y su tamaño es de 32768 bits. Entonces, la autocorrelación en bipolar de esta secuencia debería ser cero para todos los puntos excepto el punto medio. Sin embargo no lo es. Donde debería ser cero es casi cero. Por lo que hay un pequeño error en la recuperación de la señal, siendo este error directamente proporcional al número de usuarios transmitiendo simultáneamente; aunque, es casi imperceptible debido a las buenas propiedades de capacidad de separación de las señales. Esto se traduce en una cierta tasa de error en la señal recuperada dependiente de los usuarios existentes en el sistema, por lo que el límite máximo de usuarios que pueden tolerarse dependerá directamente de la tasa de error que cada uno pueda tolerar.

No existe alguna secuencia periódica que al autocorrelacionarse en bipolar sea cero excepto el punto medio. Ahora si lo trabajamos la autocorrelación en binario, entonces la respuesta sería escalonada ascendente hasta la mitad, un valor alto en el punto medio y luego sería escalonada descendente hasta el final.

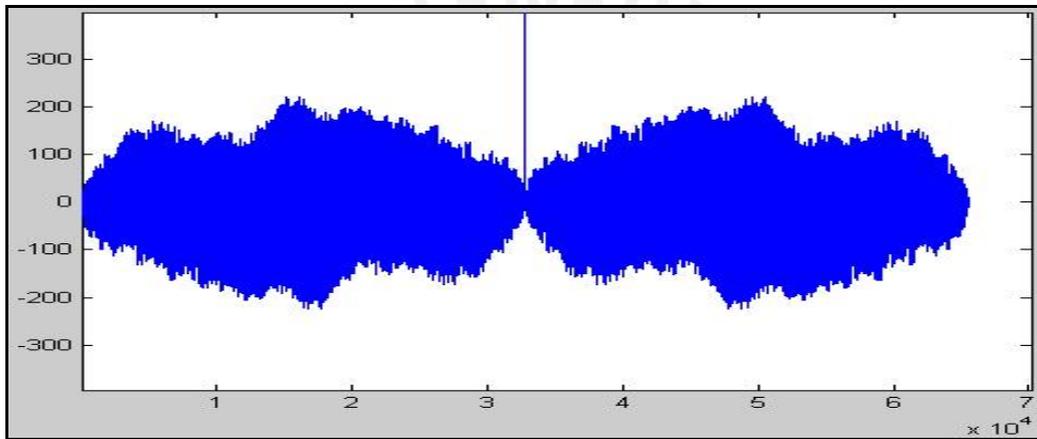
En la Figura 6. 12, esta la autocorrelación en bipolar:



Fuente propia

Figura 6. 12 – Autocorrelación en bipolar

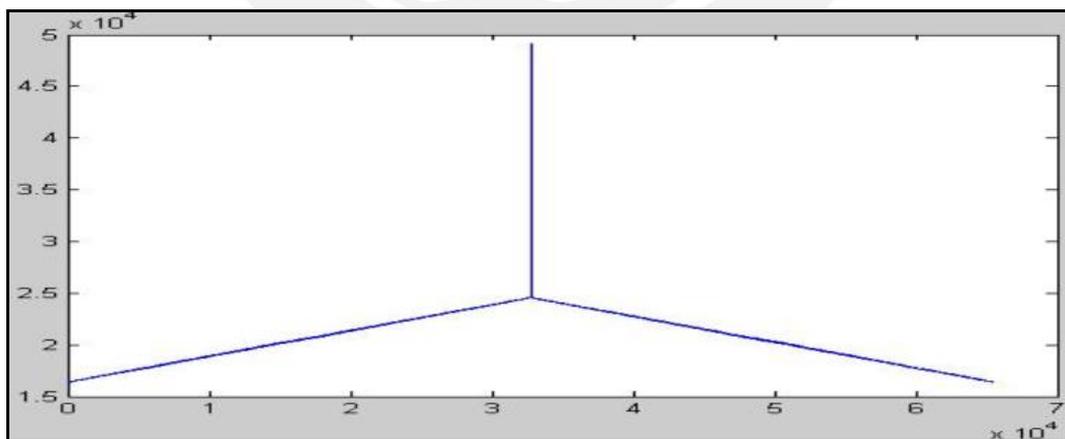
Detalladamente en valores bajos:



Fuente propia

Figura 6. 13 – Detalle de la Figura 6. 12

En esta siguiente gráfica: Figura 6. 14 muestra la autocorrelación en binario:



Fuente propia

Figura 6. 14 – Autocorrelación en binario

El programa que me ayudó a construir las figuras 6.12, 6.13 y 6.14, se encuentra en el anexo D.

Se utilizó las ecuaciones características del capítulo 5.5 para las dos secuencias pseudoaleatorias. Y se guarda estas secuencias en `secycod.mat`. También en este archivo están los códigos Hadamard ó Walsh. En resumen en este archivo guarda tres variables `secl1`, `secQ1` y `H`; correspondientes a las secuencias pseudoaleatorias `I`, `Q` y los códigos Hadamard o Walsh.

Se guardan estas variables por motivos de velocidad de procesamiento, ya que si en el programa principal operamos para que encuentre las secuencias se demoraría más que si las cargamos de un archivo.

Para guardarlos en Matlab se escribe: `SAVE('secycod','secl1','secQ1','H');`.

En `H` están los 55 códigos ortogonales correspondientes a los canales de tráfico.

5 Manual

Luego de cargar la herramienta Matlab, se escoge la carpeta donde están el programa y todos los archivos requeridos¹ por este.

Digite el nombre del programa principal. Es este caso el nombre del programa es `cdma`.

Aparecerá la siguiente ventana, como se muestra en la Figura 6. 15:

¹ Los archivos requeridos son los subprogramas; un archivo con extensión `“bmp”`, donde está graficado un grupo de celdas hexagonales; los archivos de voz; y un archivo sin extensión con las secuencias PN's y los códigos Walsh's

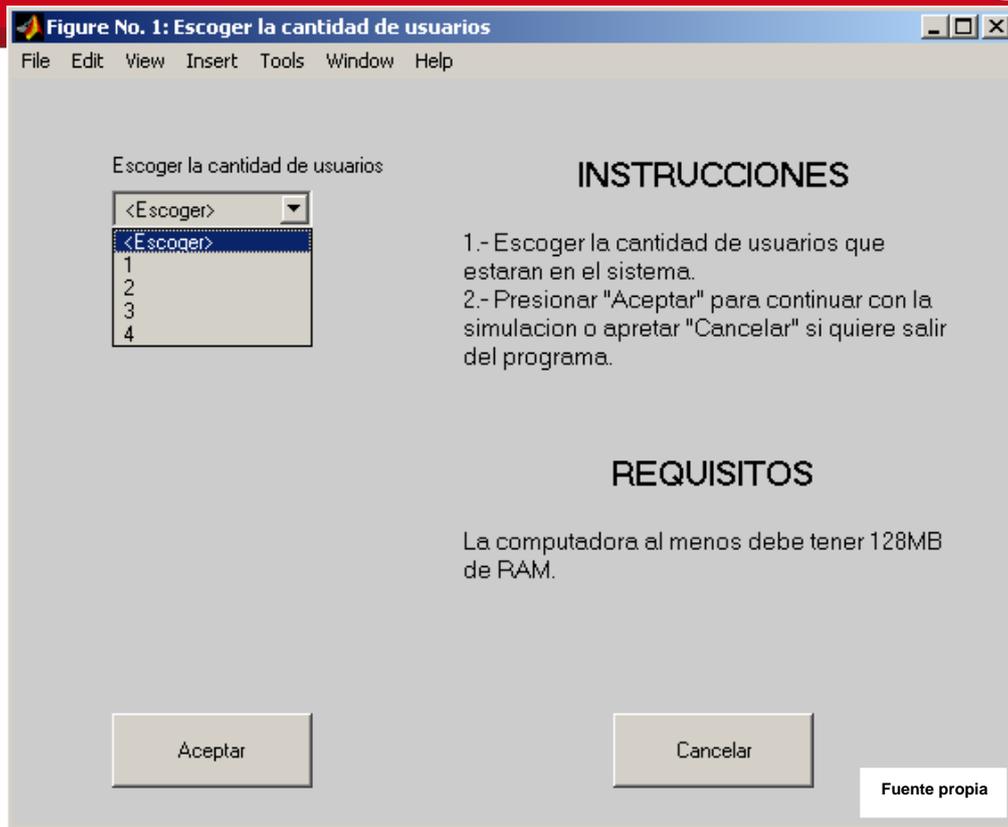


Figura 6. 15 Elección de la cantidad de usuarios

En esta ventana titulada “Figura N° 1: Escoger la cantidad de usuarios”, usted escogerá el número de usuarios que desee representar. El programa se desarrolló para simular la comunicación de 4 usuarios como máximo; no obstante, el sistema real puede soportar muchos más. Por motivos de potencia computacional y de apreciación de los procesos que se llevan a cabo, no se trabajó con el máximo de usuarios que puede soportar el sistema. Después de escoger la cantidad de usuarios, hará un clic sobre el botón “Aceptar” para continuar con la simulación. Por otro lado, si desea salir del programa, hará un clic sobre el botón “Cancelar”.

Cuando haga clic sobre el botón “Aceptar” aparecerá una ventana como se aprecia en la **Figura 6. 16**, donde se podrá ingresar datos acerca del sistema: la velocidad de la estación móvil, el radio de la cobertura de una celda y la elección entre dos opciones. Las opciones referidas son:

1. La primera opción calcula la cantidad de tramas que va a transmitir sin tener consideración del audio, contemplando dos casos:
 - a. Si el cálculo a partir del audio es menor que el cálculo a partir del recorrido entonces se repetirá el audio.

- b. Si el cálculo a partir del audio es mayor que el cálculo a partir del recorrido entonces se procesará una porción del audio; ya que la estación móvil habrá llegado a su destino antes que el audio sea completado.
 2. La segunda opción calcula la cantidad de tramas que va a transmitir a partir del cálculo menor entre el recorrido y el audio, contemplando dos casos:
 - a. Si el cálculo a partir del audio es menor que el cálculo a partir del recorrido entonces la estación móvil no podrá llegar a su destino, ya que completó la transmisión del audio.
 - b. Si el cálculo a partir del audio es mayor que el cálculo a partir del recorrido entonces se procesará una porción del audio, porque la estación móvil habrá llegado a su destino antes que el audio sea completado.

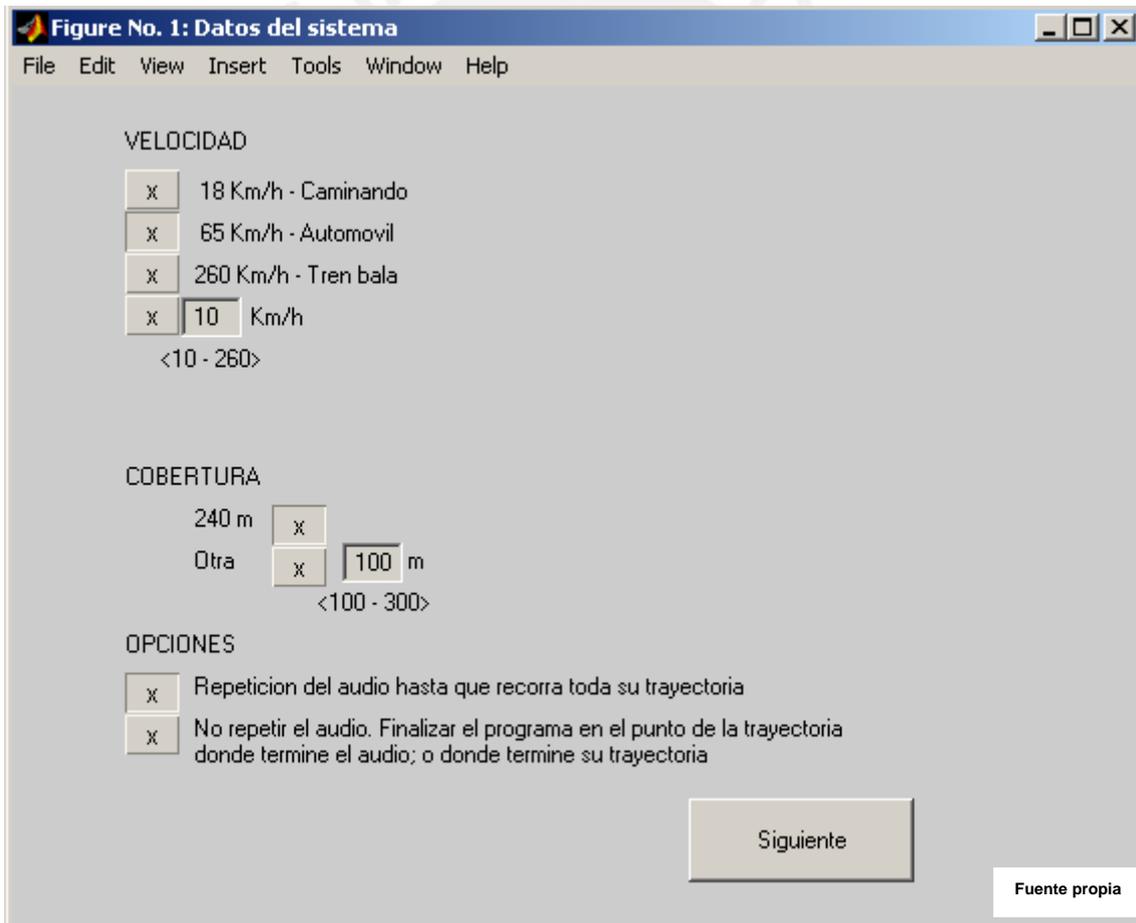
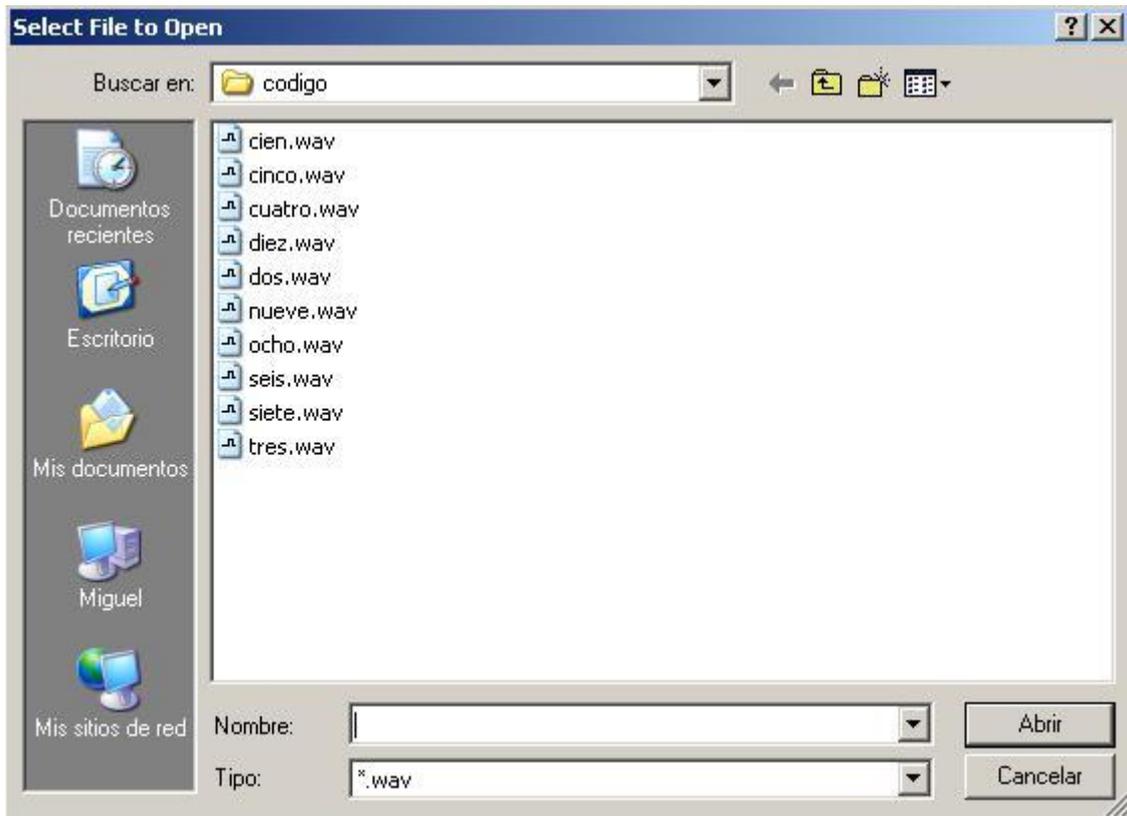


Figura 6. 16 Datos del sistema

Los datos del sistema por defecto se encuentran seleccionados en la ventana de configuración. Después de hacer clic en el botón “siguiete”. Se abrirá un

explorador (Figura 6. 17) para que usted pueda escoger el archivo de voz de cada usuario a representar.



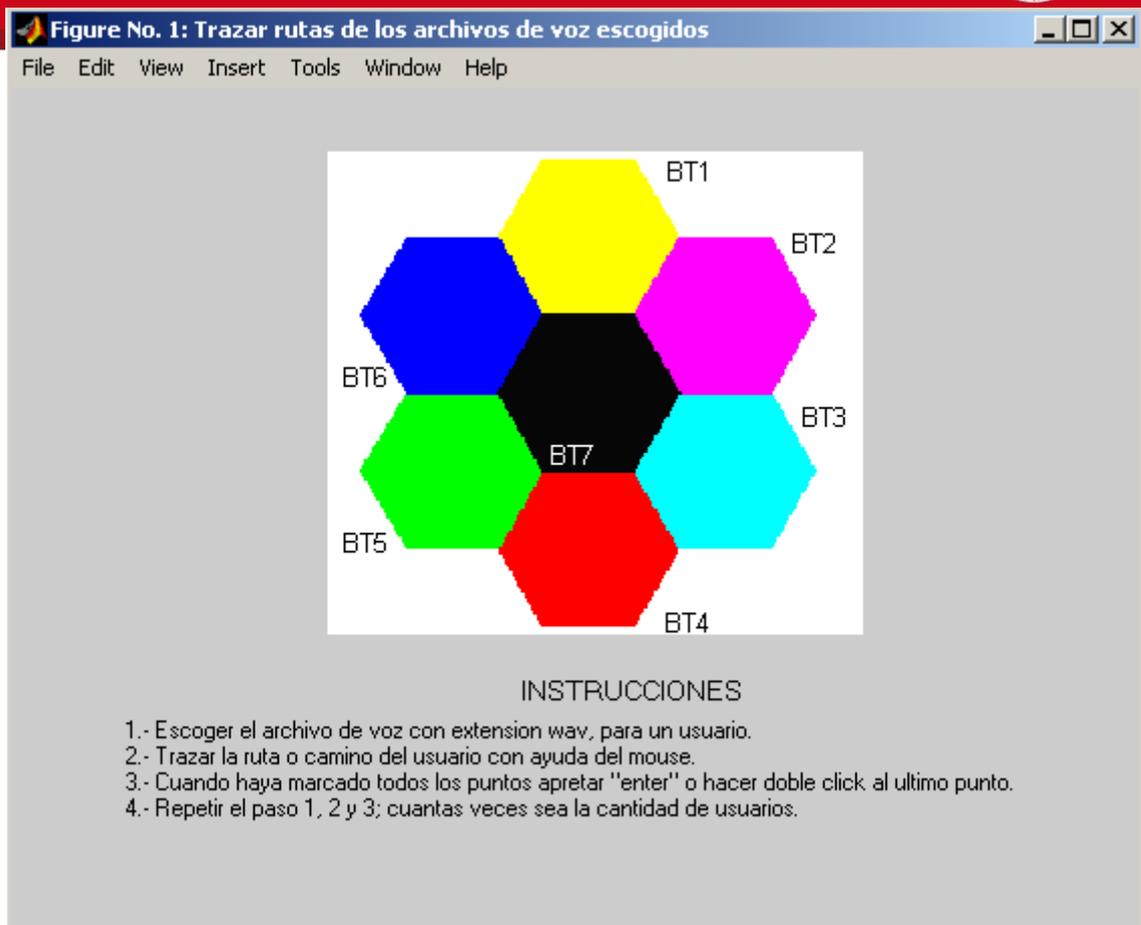
Fuente propia

Figura 6. 17 – Escoger el archivo de voz

Las señales de voz deben ser archivos guardados en el disco duro del computador donde se trabaja, de tal manera, que hay flexibilidad en escoger cualquier archivo con extensión wav. Por motivos de performance del computador, se recomienda que los archivos no sean mayores a 100 kb y por último que estén grabados en una frecuencia de 8000 Hz. de tipo 'mono' con resolución de 8 bits¹.

Posteriormente de escoger el archivo, aparecerá una ventana titulada “Figura N° 1: Trazar rutas de los archivos de voz escogidos”, como se muestra en la Figura 6. 18.

¹ El programa que se utilizó para acondicionar los archivos de voz fue el Cool edit 2000, propiedad intelectual de Syntrillium Software Corporation.



Fuente propia

Figura 6. 18 Trazado de la ruta

El programa muestra un área geográfica pequeña, conformada por siete celdas, las cuales están distinguidas por diferentes colores. Cada celda contiene una estación base.

Con relación a la trayectoria del usuario en el área explorada, se deben trazar puntos con ayuda del ratón dentro del cuadro donde está contenida la gráfica. Si se marca un punto fuera de las coberturas de las celdas, pero dentro del cuadro mencionado (parte blanca); entonces no se mostrará la potencia de está señal por el tiempo que esté fuera de la cobertura. Sólo se mostrarán los puntos dentro de la cobertura de las celdas. Adicionalmente, si se marcara algún punto fuera del cuadro, entonces Matlab mostrará un error y saldrá del programa.

Luego de escoger todos los puntos de la ruta del usuario se presionará la tecla 'Enter' ó hará doble clic sobre el último punto de la trayectoria. Se escogerán tantos archivos de voz y rutas como el número escogido de usuarios.

En las siguientes figuras: Figura 6. 19 se representará un ejemplo, en el cual se escogerá 4 rutas para 4 usuarios. Como se aprecia en las figuras, se tiene total libertad para escoger la ruta de un usuario con el ratón. En el tercer caso se aprecia que el usuario se traslada casi en el límite de la cobertura de una estación base. En el cuarto caso se aprecia que parte de la trayectoria del usuario no esta cubierta por ninguna cobertura de las estaciones bases. Se trató de escoger diversas rutas para obtener diversas respuestas en la gráfica de las potencias.

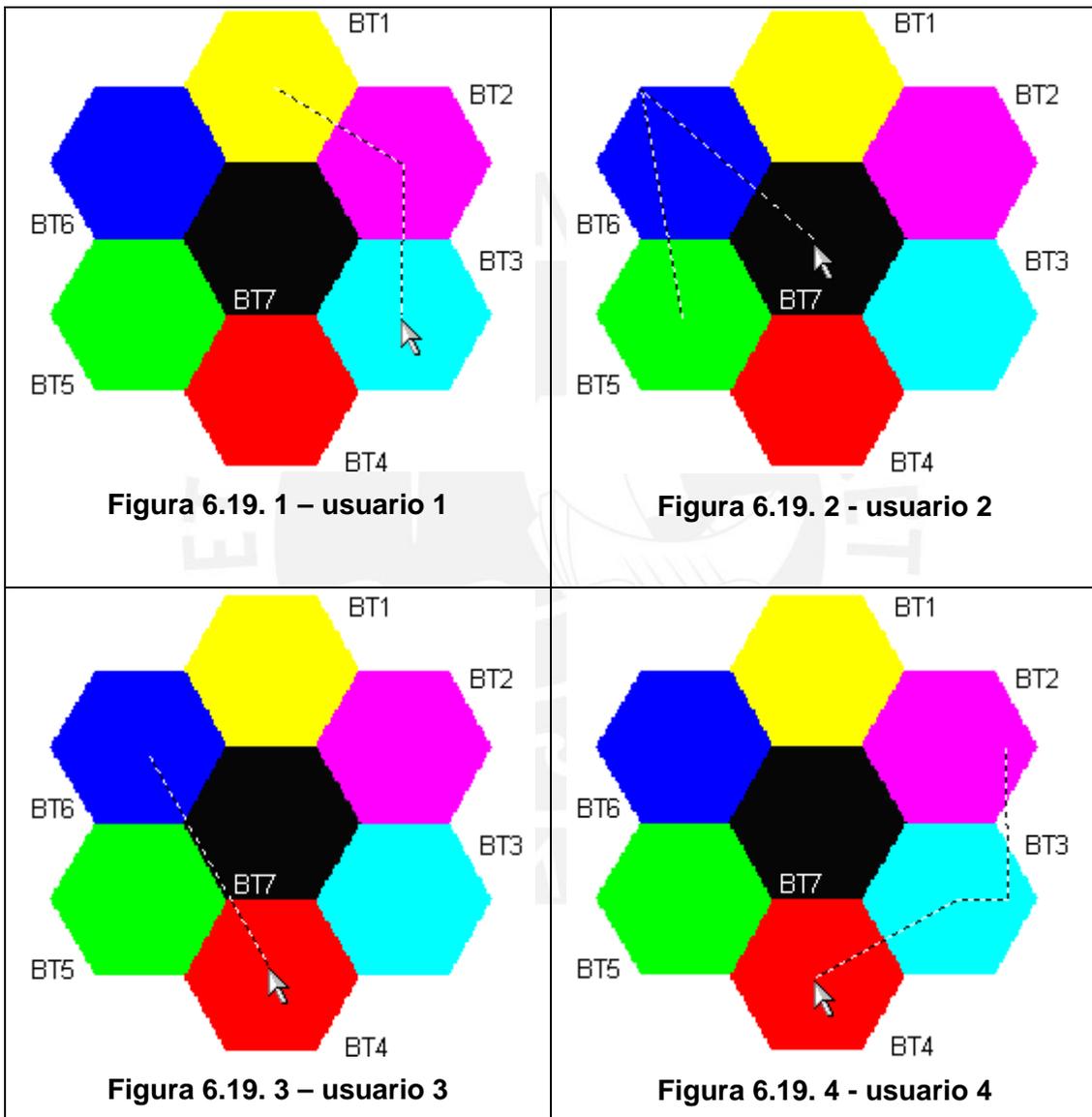


Figura 6. 19 – Ejemplo

En la **Figura 6. 20** se grafica la potencia de cada uno de los usuarios de acuerdo con la distancia de la estación móvil a la antena de la estación base (Se consideró las pérdidas en el espacio libre). El color de la potencia de cada uno de los usuarios representa la estación base a la cual están comunicándose.

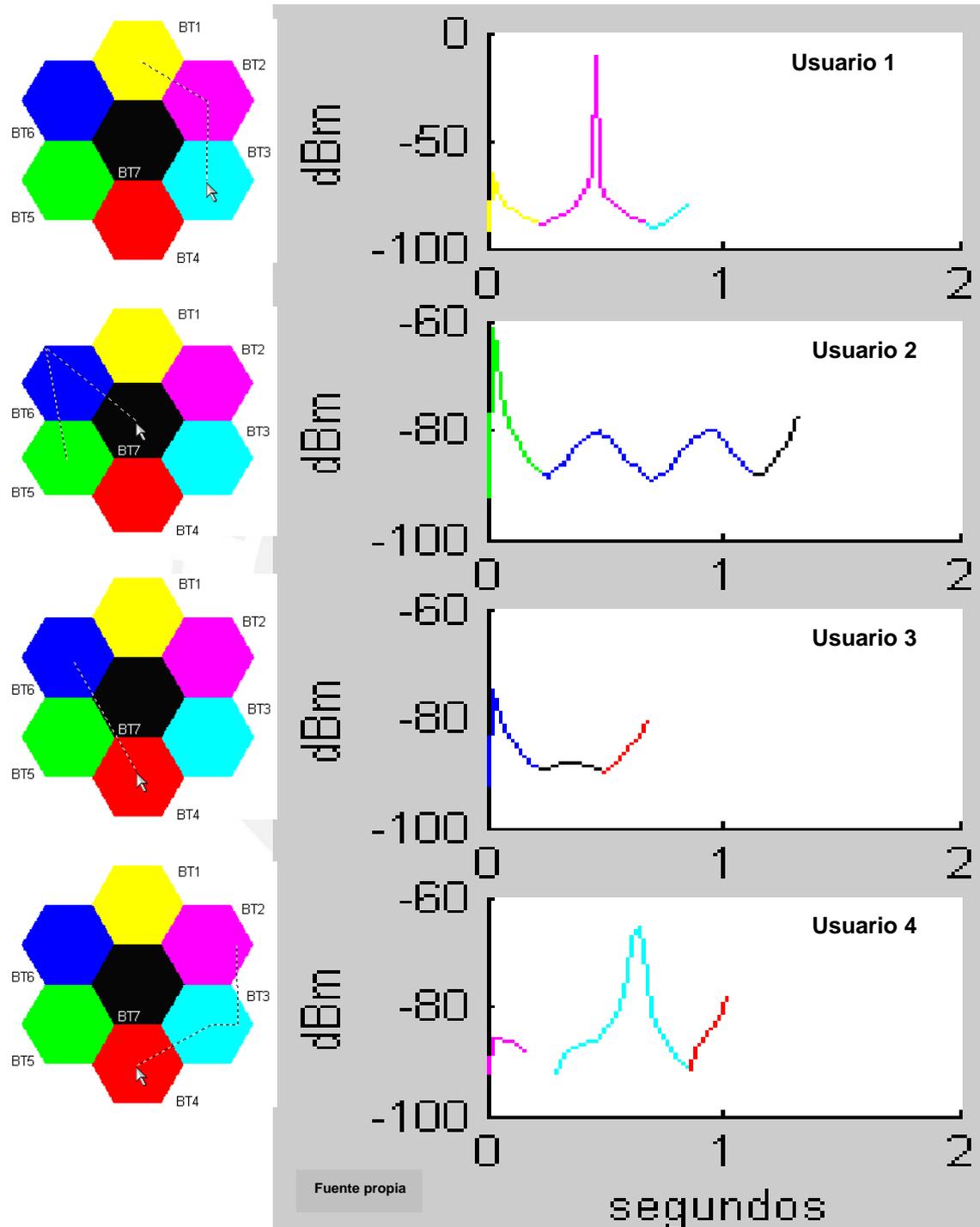


Figura 6. 20 – Resultado

Las unidades de las gráficas contenidas en **Figura 6. 20** son segundos Vs dBm. El decibel es una expresión logarítmica de la relación de dos magnitudes del mismo

tipo. En este caso, se tomó como referencia el milivatio (mW), en consecuencia la unidad que se utiliza en las graficas es el dBm.

Cada cierto tiempo se grafica la siguiente trama, hasta la totalidad de cada archivo de voz ó haya finalizado su trayectoria según la opción que haya escogido. Mientras las potencias de los usuarios se van graficando, también van apareciendo algunos números en las celdas. Estos números indican qué usuarios están transmitiendo en esa celda (Figura 6. 21). Si quisiera terminar el programa puede hacerlo apretando el botón “Salir”.

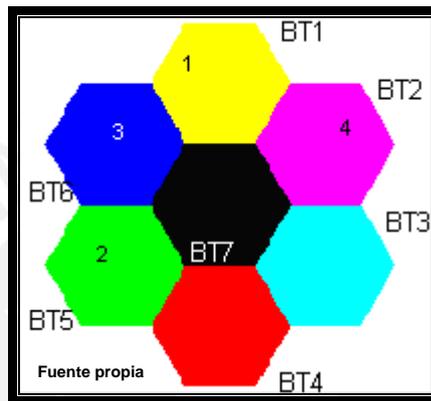


Figura 6. 21 - Cobertura

En cualquier momento puede salir del programa apretando el 'x' ubicado en la esquina superior derecha de toda ventana.

CAPITULO 7.- CONCLUSIONES

El sistema CDMA tiene varias etapas para codificar la señal original consecuentemente es improbable recuperar la señal, con solo atrapando la señal electromagnética en el interfase aire, esto le brinda seguridad al sistema.

El comportamiento de la potencia de la señal transmitida del terminal se comporta de diferente manera que el de la recibida, ya que mientras está más lejos de la antena de la estación base entonces el terminal amplifica su señal para que llegue con la potencia adecuada para poder recuperar la señal original. Adicionalmente, cuando el terminal está cerca de la antena de la estación base entonces disminuye hasta la potencia adecuada. La potencia adecuada debe ser tal que no sea tan grande que perjudique las señales de otros terminales o usuarios y no tan pequeña para no poder recuperarla.

La implementación de los algoritmos para la simulación de la interfase IS-95 resultó de mediana complejidad, algunos de los cuales requieren una más profunda revisión.

Los resultados obtenidos de las simulaciones son exitosos, pero se podrían mejorar realizando una revisión más exhaustiva de los procesos y ajustes de los algoritmos.

CAPITULO 8.- OBSERVACIONES

En el programa se preasignan varias funcionalidades. Se simula el canal de tráfico del Enlace directo (de la estación base al móvil), pero no se emplea el canal piloto ni el canal de sincronismo.

No se utiliza el canal de paging; este es un canal de control por el cual la estación móvil se comunica con la red, y por el cual la red le asigna el código Walsh que debe usar para la recepción de la señal. Por lo tanto, al no usar el canal de paging la asignación del código Walsh a cada usuario se establece en una tabla, identificándose a cada usuario en particular.

El ESN que es utilizado para generar la secuencia pseudoaleatoria larga; la que a su vez sirve para encriptar los canales de usuario, se transmite también por el canal de paging. En el caso de esta simulación no se utiliza esta característica.

Se asume que existe sincronización entre los elementos del sistema, lo que fue simple de realizar, debido a que solo necesitaba de un reloj. Si se hubiera trabajado con señales no sincronizadas, se hubiera tenido que recortar el menor tiempo del sistema llamado *tiempo chip* en varias partes para después sincronizarlos.

El Receptor Rake no es implementado ya que este dispositivo se emplea en ambientes donde la señal recibida llega por caminos diferentes a la estación móvil, para la presente simulación consideramos un camino directo.

El control de potencia tampoco se realiza, debido a que solo se ha implementado el enlace directo (Forward Link) y no el enlace inverso (Reverse Link).

Para el programa de simulación consideramos condiciones ideales, por lo que no es necesario calcular la probabilidad de error del sistema planteado.

El Handoff entre celdas es ideal, de tal manera que si un punto es colocado cerca del límite de dos celdas, entonces será procesado por la estación base a la cual el punto pertenece.

Los procesos considerados son, el Chequeo de Redundancia Cíclica (CRC), el relleno de trama, el codificador convolucional y el entrelazado (Interleaving).

La codificación usada para este sistema esta basada un modelo LPC de 19 polos, lo cual hace que la señal recuperada sea algo robótica y con algunos problemas de reconocimiento por parte de los oyentes. Debió haberse operado con una cantidad mayor de polos como 25, pero por motivos de espacio para que alcanzara en la trama de bits se trabajó una cantidad menor. Se mejoraría si se emplean algoritmos RELPC o CELPC.



CAPITULO 9.- RECOMENDACIONES

1. La tesis puede darle utilidad los profesores de pregrado en universidades, para enseñar el tema de los sistemas celulares en un curso de telefonía móvil.
2. Se puede implementar un módulo en un futuro como parte de un proyecto para el desarrollo de la investigación de este sistema (CDMA). El módulo puede estar conformado por computadoras con tarjetas inalámbricas, simulando estaciones bases; y laptops (computadoras portátiles), simulando móviles.

Se podría trabajar en la frecuencia de la tarjeta inalámbrica, la cual es de 2.4 GHz., de esta manera no invadiríamos las frecuencias comerciales de los sistemas celulares. Para este proyecto se deberá implementar los canales de sincronizaciones y de controles. Estos canales no fueron simulados en este trabajo.

El sistema operativo que se podría utilizar sería linux, porque este sistema es más robusto para sistemas de comunicaciones, y es libre.

3. Se puede completar el presente estudio desarrollando los ítems faltantes indicados en las observaciones, los cuales le darían un comportamiento más real a los resultados obtenidos luego de la simulación.
4. Para profundizar la investigación, podríamos buscar fondos o subvenciones, de organismos privados o estatales que apoyen a las investigaciones tecnológicas.
5. Se podrían formar grupos de interés con otras universidades para el desarrollo de la investigación de este tema.

http://mailweb.udlap.mx/~lgojeda/telecomsis/walsh_codes%20_generation/generacion_cw.htm

29/09/2003

http://mailweb.udlap.mx/~lgojeda/telecomsis/walsh_codes%20_generation/usocdma.htm

29/09/2003

http://mailweb.udlap.mx/~lgojeda/telecomsis/speech_coders/desarrollo.htm#Inicio

29/09/2003

<http://personal.iddeo.es/isoltel/tcelu/umts.htm>

30/10/2003

<http://www.telcel.net.ve/tcelular/3generacion.asp>

15/11/2003

http://www.swisswireless.org/wlan_calc_es.html

18/11/2003

<http://www.fcagr.unr.edu.ar/catedras/mdt/GTS/Zonaedu/perremot11.htm>

27/11/2003

<http://www.ee.ic.ac.uk/hp/staff/dmb/voicebox/voicebox.html>

12/12/2003



GLOSARIO

AMPS.- (Advanced Mobile Phone System) Es el primer sistema celular autorizado en Estados Unidos. Amps usa FM, por lo que es muy fácil de escuchar la transmisión. También particularmente es ineficiente en el uso del espectro y la calidad es inferior, a comparación con cualquier sistema digital.

Bit.- Es la unidad de comunicación en cualquier sistema, el cual representa un cero o uno lógico. Contiene varios chips.

Chip.- Este concepto es exclusivo de CDMA. Se refiere al dígito binario transmitido sobre RF a la velocidad de 1.2288 Mhz.

Celular.- El término es usado en los diferentes sistemas que existen en el mercado. Según FCC, el término refiere al sistema de teléfonos portátiles, funcionando a través de diferentes celdas o células.

Codec.- (compressor/decompressor) se refiere al dispositivo dentro del teléfono que digitaliza la voz y la comprime previamente a la transmisión en la celda; a su vez toma la voz comprimida recibida de la celda para su descompresión antes de reproducirla en el auricular del teléfono.

Los algoritmos de los codecs son extremadamente sofisticados, diseñados específicamente tomando las características de la voz del oído humano.

Dual band.- Es el terminal que tiene la posibilidad de operar en dos diferentes bandas.

Dual mode.- Es el terminal que tiene la posibilidad de operar dos diferentes protocolos en una misma banda.

ESN.- Es el único número que fue asignado por el proveedor del teléfono.

GPS.- (Global Positioning System) Es un sistema donde el receptor obtiene datos de su ubicación precisa y a la vez el tiempo exacto. Para el sistema CDMA, este dato es crucial para sincronizar la secuencia pseudoaleatoria larga y corta.

IS-95.- Es el estándar que describe el sistema CDMA operando a 800 MHz.

Multicamino.- Se refiere al fenómeno en RF, donde la señal llega en múltiples tiempos al receptor. CDMA es el único que aprovecha esta desventaja con el receptor Rake. El receptor Rake tiene la función de combinar todas las señales desfasadas para una mejor recepción.

MTC.- Ministerio de Transporte y Comunicaciones.

NAM.- Es el identificador del sistema al que pertenece, según su numeración telefónica.

Ortogonal.- Se refiere a la peculiaridad de dos vectores que al integrarse dan como resultado cero.

PCS.- (Personal Communication System) Es un estándar que opera en la banda de 1900 MHz. Este estándar utiliza CDMA.

RF.- Son las siglas de radio frecuencia y es comúnmente utilizada para referirse al espectro radioeléctrico.

Sector.- Es la porción de la cobertura de una estación base, la cual se diferencia por su secuencia pseudoaleatoria corta. Desde el punto de vista del teléfono no diferencia entre un handoff entre celdas y entre sectores.

SID.- Es el número identificador de la red, la cual está relacionada con el lugar de origen.

Trama.- La información se transmite o recibe en conjuntos de bits llamadas tramas, la cual tiene un determinado número de bits. Estas tramas no son de larga duración para que no haya un retraso notorio en la comunicación. El codec es el que determina el tamaño de la trama.