



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“LOS SISTEMAS DE COMUNICACIÓN PERSONAL INALÁMBRICOS  
ANTE EL COMPORTAMIENTO DEL CORRIMIENTO DOPPLER”

TESIS

Que para obtener el título de Ingeniero Eléctrico y Electrónico presenta :

Elizabeth Hernández Quintero

Director de Tesis

M. en A. María del Carmen Maldonado Susano



México D.F., Abril de 2003

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>CAPÍTULO 1. LAS COMUNICACIONES PERSONALES INALÁMBRICAS</b>	
Bosquejo Histórico	2
Funcionamiento de los sistemas de comunicación personal inalámbricos	9
Técnicas de acceso	16
Generaciones de la telefonía celular	27
Perspectivas (4G y 5G)	37
Normatividad en México	42
<b>CAPÍTULO 2. EL CORRIMIENTO DOPPLER</b>	
Descripción del corrimiento Doppler	47
Análisis matemático	51
Áreas de aplicación	52
<b>CAPÍTULO 3. LOS SISTEMAS DE COMUNICACIÓN PERSONAL INALÁMBRICOS ANTE EL CORRIMIENTO DOPPLER</b>	
Introducción	55
Descripción del medio de transmisión de radio móvil	57
Estudio del desvanecimiento de múltiples trayectorias	58
La propagación Doppler	62
<b>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DEL PROBLEMA</b>	
Medida de la propagación Doppler	64
La solución	84
Dispositivos de compensación	85
<b>CAPÍTULO 5. ELABORACIÓN DEL DISEÑO</b>	
Modelo de un sistema de comunicación	91
Propuesta de un sistema capaz de eliminar el corrimiento Doppler	92
<b>CONCLUSIONES</b>	102
<b>APÉNDICE</b>	
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	

## INTRODUCCIÓN

Con la presente tesis se pretende mostrar la gran importancia que actualmente presentan los Sistemas de Comunicación Personal Inalámbricos, debido a que el sueño del hombre por comunicarse a grandes distancias no cesó en los teléfonos fijos, sino que pensó en un aparato que no importando donde estuviera ubicado pudiera comunicarse; por ejemplo, en otro país, en movimiento, etc. De aquí que hayan nacido los Sistemas de Comunicación Personal Inalámbricos.

Las transmisiones inalámbricas constituyen en la actualidad una eficaz y poderosa herramienta que permite la transferencia de voz, datos y video, sin la necesidad de utilizar cables para establecer la conexión.

Esta transferencia de información es lograda a través de la emisión de ondas de radio, permitiendo así tener dos grandes ventajas las cuales son la movilidad y flexibilidad del sistema en general.

Se da un bosquejo histórico de la evolución de los sistemas inalámbricos desde sus comienzos, sus precursores, y muestra además cual es la tendencia actual y los desarrollos llevados a cabo hasta el momento. Por otra parte se mencionan los aspectos principales del sistema radio celular y como están conformados.

Así mismo resulta indispensable estudiar el corrimiento Doppler y la manera en que este influye en dichos sistemas, además se analiza la recepción de una señal transmitida por una estación terrena a un satélite con órbita elíptica y el comportamiento de la misma en el dominio de la frecuencia por los efectos del movimiento

Una de las partes más significativas de esta tesis son los datos y tablas relacionados con el análisis realizado para determinar la manera en la cual el corrimiento Doppler afecta a los Sistemas de Comunicación Personal Inalámbricos en una órbita elíptica ubicada en un plano ecuatorial.

Los resultados obtenidos del análisis antes mencionado permitirán proponer un dispositivo que sea capaz de corregir la presencia del corrimiento Doppler.

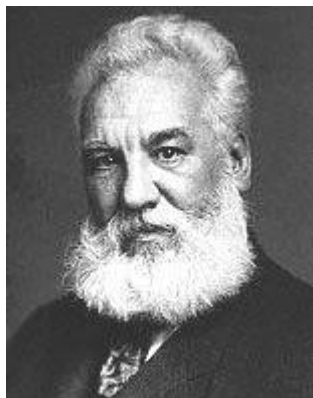
## CAPÍTULO 1

### LAS COMUNICACIONES PERSONALES INALÁMBRICAS

#### *BOSQUEJO HISTÓRICO*

Si nos remontamos en la historia, encontramos que las comunicaciones inalámbricas comenzaron con:

- ◆ La postulación de las ondas electromagnéticas por James Clerk Maxwell durante el año de 1860 en Inglaterra.
- ◆ La invención del teléfono por Graham Bell en 1876 (ver figura 1.1).
- ◆ La demostración de la existencia de las ondas electromagnéticas por Heinrich Rudolf Hertz en 1880 en Inglaterra.
- ◆ La invención del telégrafo inalámbrico por Guglielmo Marconi (ver figura 1.1).



a)



b)

**Figura 1.1** a) Alexander Graham Bell, b) Guglielmo Marconi.

Durante 1890 eminentes científicos como Jagdish Chandra Bose de India, Oliver Lodge en Inglaterra y Augusto Righi de la Universidad de Bologna, se encargaron del estudio de los fundamentos naturales de las ondas electromagnéticas.

La noción de la transmisión de información sin el uso de cables fue vista por nuestros ancestros como algo mágico.

En 1896 la primera patente de comunicaciones inalámbricas fue concedida a Guglielmo Marconi en el Reino Unido. Desde aquel momento, el número de desarrollos en el campo de las comunicaciones inalámbricas tomó su sitio.

Posteriormente AT&T introdujo el primer servicio telefónico móvil en los Estados Unidos el 17 de junio de 1946 en San Luis, Missouri. El sistema operaba con 6 canales en la banda

de 150 MHz con un espacio entre canales de 60 KHz y una antena muy potente. Este sistema se utilizó para interconectar usuarios móviles (usualmente autos) con la red telefónica pública, permitiendo así, llamadas entre estaciones fijas y usuarios móviles. Un año después, el servicio telefónico móvil se ofreció en más de 25 ciudades de los EUA y unos 44,000 usuarios en total, aunque por desgracia había 22,000 más en una lista de espera de cinco años. Estos sistemas telefónicos móviles se basaban en una transmisión de Frecuencia Modulada (FM - Modulate Frequency). La mayoría de estos sistemas utilizaban un solo transmisor muy poderoso para proveer cobertura a más de 80 Km desde la base. Los canales telefónicos móviles de FM evolucionaron a 120 KHz del espectro para transmitir la voz con un ancho de banda de 3KHz. Aunque se esperaban mejoras en la estabilidad del transmisor, en la figura de ruido y en el ancho de banda del receptor.

La demanda para el servicio de telefonía móvil creció rápidamente y permaneció por detrás de la capacidad disponible en muchas de las ciudades de gran tamaño. Es increíble que a pesar de la demanda hayan pasado más de 30 años para cubrir las necesidades de telefonía móvil. La capacidad del sistema era menor que el tráfico que tenía que soportar, por ello, la calidad del servicio era terrible, las probabilidades de bloqueo eran del 65% o más altas. La inutilidad del teléfono móvil disminuyó la frecuencia de su uso ya que los usuarios encontraron que era mejor prevenir no hablando en horas picos. Los usuarios y las compañías telefónicas se dieron cuenta que un conjunto de canales no sería suficiente para desarrollar un servicio telefónico móvil útil. Se necesitarían grandes bloques del espectro para satisfacer la demanda en áreas urbanas.

En 1949, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC - Federal Communications Comisión) dispuso más canales y la mitad se los dió a la compañía Bell System y la otra mitad a compañías independientes como la Portadora de Radio Común (RCC - Radio Common Carriers), con la intención de crear la competencia y evitar los monopolios. Fue a mediados de los 50 cuando se creó el primer equipo para viajar en auto de menor tamaño. Esto sucedió en Estocolmo, en las oficinas centrales de Ericsson pero no fue sino 10 años después cuando los transistores redujeron en peso, tamaño y potencia para poder introducirlos al mercado.

En 1956, la Bell System comenzó a dar servicio en los 450 MHz, que era una nueva banda para tener una mayor capacidad. En 1958, la Richmond Radiotelephone Co. mejoró su sistema de marcado conectando rápidamente las llamadas de móvil a móvil. A mediados de los 60's el Sistema Bell introdujo el Servicio Telefónico Móvil Mejorado (IMTS – Service Telephonic Mobile Improved) con características mejoradas. Las mejoras en el diseño del transmisor y del receptor permitieron una reducción en el ancho de banda del canal de FM de 25-30 KHz.

A finales de los 60's y principios de los 70's el trabajo comenzó con los primeros sistemas de telefonía celular. Las frecuencias no eran reutilizadas en células adyacentes para evitar la interferencia en estos primeros sistemas celulares.

En enero 1969 la Bell System aplicó por primera vez el rehúso de frecuencias en un servicio comercial para teléfonos públicos de la línea del tren de NY. a Washington, DC.

Para desarrollar este sistema se utilizaron 6 canales en la banda de 450 MHz en nueve zonas a lo largo de una ruta de 380 Km.

Se debe reconocer que la primera generación de radio celular analógico no fue una nueva tecnología pero si una nueva idea, el de reorganizar la tecnología existente IMTS a gran escala. Mientras que las comunicaciones de voz utilizaron el mismo FM analógico que se había estado usando desde la II Guerra Mundial, dos mejoras importantes hicieron el concepto celular realidad. A principios de los 70's se inventó el microprocesador; aunque los algoritmos complejos de control se implantaban en lógica con cables, el microprocesador hizo más fácil la vida de todos. La segunda mejora fue en el uso de un enlace de control digital entre el teléfono móvil y la estación base. No fue sino hasta marzo de 1977 cuando la FCC aprobó que Bell probara un sistema celular en Chicago.

En 1978, en EUA. comenzó a operar el Servicio de Telefonía Móvil Avanzado (AMPS - Advanced Mobile Phone Service). En ese año, 10 células cubrían 355000 Km cuadrados en el área de Chicago, operando en las nuevas frecuencias en la banda de 800 MHz. Esta red utilizaba circuitos integrados, una computadora dedicada y un sistema de conmutación, lo que probó que los sistemas celulares podían funcionar.

El desarrollo de AMPS fue muy rápido, un sistema comenzó a operar en mayo de 1978 en Arabia Saudita, otro en Tokio en diciembre de 1979 y el primero en nuestro país en 1981. Entonces, surgió por parte de la FCC otro requisito de competencia. Un proveedor de servicio celular tenía que coexistir con la Bell System en el mismo mercado (Bandas A y B). Entonces Ameritech entró en Chicago el 12 de octubre de 1983.

AT&T desarrolló un modelo junto con Motorola conocido como Sistema de Comunicación de Acceso Total (Dyna-TACS o TACS - Total Access Communications System), el cual se puso en marcha en Baltimore y en Washington DC. por la compañía Cellular One el 16 de diciembre de 1983.

Otro estándar que surgió fue el de AURORA-400 en Canadá en febrero de 1983 utilizando equipo de GTE y NovAtel. Este sistema llamado descentralizado operaba en los 420 MHz y utilizaba 86 células, funcionando mejor en áreas rurales por su poca capacidad pero cobertura amplia. En Europa, el Sistema de Telefonía Móvil Nórdico (NMT450 -Nordic Mobile Telephone System) inició operaciones en Dinamarca, Suecia, Finlandia y Noruega en el rango de 450 MHz. En 1985 la Gran Bretaña empezó a usar TACS en la banda de 900 MHz. Más tarde, Alemania Occidental implementó C-Netz, Los franceses Radiocom 2000, y los Italianos RTMI/RTMS. Todos ellos ayudaron a que hubiera nueve sistemas incompatibles, a diferencia de los EUA que no sufrían de este problema. Desde aquí se pensó en un plan para crear un sistema digital único para Europa.

Para ejemplificar el desarrollo del mercado, la industria celular creció de menos de 204,000 suscriptores en 1985 a 1,600,000 en 1988 en EUA.

A finales de los 80's el interés emergió hacia los sistemas celulares de tipo digital, donde ambos, la voz y el control fueran digitales. El uso de tecnología digital para reproducción de discos compactos popularizó la calidad del audio digital. La idea de eliminar el ruido y

proveer el habla clara hasta los límites de cada área de servicio fueron atractivos para los ingenieros y usuarios comunes.

En 1990, el sistema celular en EUA agregó una nueva característica, el tráfico de la voz se convirtió en digital. Esto triplicó la capacidad con el muestreo, digitalización y multicanalización de las conversaciones. Para 1991, el servicio celular digital comenzó a emerger reduciendo el costo de las comunicaciones inalámbricas y mejorando la capacidad de manejar llamadas de los sistemas celulares analógicos.

En 1989 surge GSM primero conocido como Grupo Especial Móvil y luego como Sistema Global para Comunicaciones Móviles. Lo más destacado de él es que unifica los sistemas europeos. Desde 1993 los sistemas se estaban desbordando de usuarios en EUA, estos crecieron de medio millón en 1989 a más de trece millones en 1993. En 1994, Qualcomm, Inc. propuso un escenario de espectro esparcido para incrementar la capacidad. Construido en conocimientos anteriores, el Acceso Múltiple por División de Código (CDMA - Code Division Multiple Access), sería en todos sus elementos digital, además de que prometía de 10 a 20 veces mayor capacidad. En estos días más de la mitad de los teléfonos en el mundo operaban de acuerdo a los estándares de AMPS, y en su inicio más humilde nadie pensó que sería el que conviviría con Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA - Time Division Multiple Access) o CDMA para obtener sistemas duales con tecnología analógica y digital.

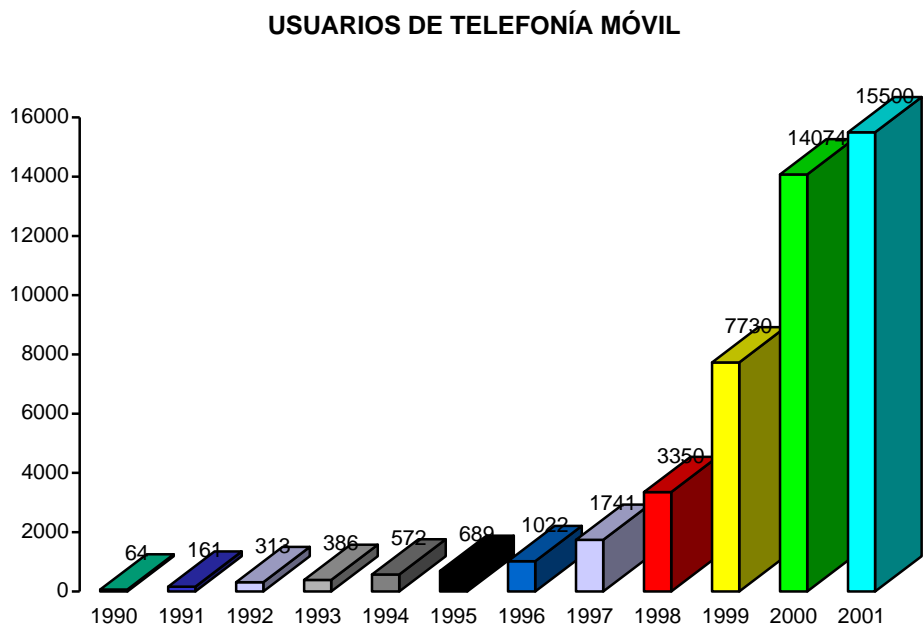
El 14 de enero de 1997, la FCC abrió un nuevo grupo de frecuencias inalámbricas que permitiría el desarrollo de las tecnologías como CDMA: la banda de 1900. El Sistema de Comunicación Personal (PCS – Personal Communication System) 1900 es la contraparte en frecuencia de GSM y aunque está en desarrollo tiene un gran potencial.

En México, es hasta 1984 cuando Telcel obtiene la concesión para explotar la red de servicio radiotelefónico móvil en el área metropolitana de la Ciudad de México, bajo la denominación de "Radiomóvil Dipsa S.A. de C.V." operando en las bandas radiofónicas de 450-470 y 470-512 MHz. La Secretaría de Comunicaciones y Transportes convocó la introducción de la telefonía celular en nuestro país en las nueve diferentes regiones en que fue dividido. Aquí nace Iusacell, convirtiéndose en la primera compañía de telefonía celular en ofrecer el servicio en la Ciudad de México y en ese mismo año surge la marca Telcel ofreciendo los servicios de telefonía celular en la ciudad de Tijuana BC. A partir de 1990 Telcel y Iusacell expanden los servicios de telefonía celular en el Distrito Federal y su zona metropolitana y paulatinamente ofrecen el servicio a escala nacional.

El día 31 de mayo de 1989 se presentó el "Plan Nacional de Desarrollo 1989-1994" donde menciona la importancia de las telecomunicaciones destacando los siguientes puntos:

- ◆ Múltiples empresas podrán desarrollar los servicios de transmisión conmutada de: datos, teleinformática, telefonía celular y otros.
- ◆ Las concesiones de telefonía celular se sujetarán a concurso de manera abierta, y así se garantizará la mejor oferta de servicios y contraprestación económica al Estado.

A partir de 1990, se inicia la expansión en nuestro país, tal como lo muestra la figura 1.2:



**Figura 1.2** Expansión de la telefonía móvil.

y al igual que en el resto del mundo, el crecimiento de los teléfonos móviles ha sido muy grande, como por ejemplo Japón, que cuenta con 63.38 millones de celulares.

En 1980 comienza la era celular. Diferentes desarrollos y nuevas tecnologías tomaron lugar durante los años de 1990 al 2000.

La tabla 1.1 muestra un panorama global de lo que han sido las comunicaciones inalámbricas. Esta tabla solo contiene comunicaciones inalámbricas en términos de tecnologías de radio. Los sistemas de comunicaciones personales apuntan a proporcionar voz portátil y servicios de comunicación de datos a abonados fijos, ambulantes y móviles sin restricciones espaciales y temporales en un área de servicio geográfico predefinido, usando una dirección única de usuario (número único telefónico personal). Las redes móviles celulares han resuelto satisfactoriamente el problema de la movilidad de terminales. Las comunicaciones personales vía radio ampliarán esta capacidad para incluir la movilidad personal.

Desde el punto de vista técnico existen dos propiedades que hacen de las comunicaciones móviles una realidad: primero, la disponibilidad de terminales baratas de bajo consumo y peso ligero; segundo, la aparición de tecnologías de red inteligente para desarrollar los servicios necesarios.



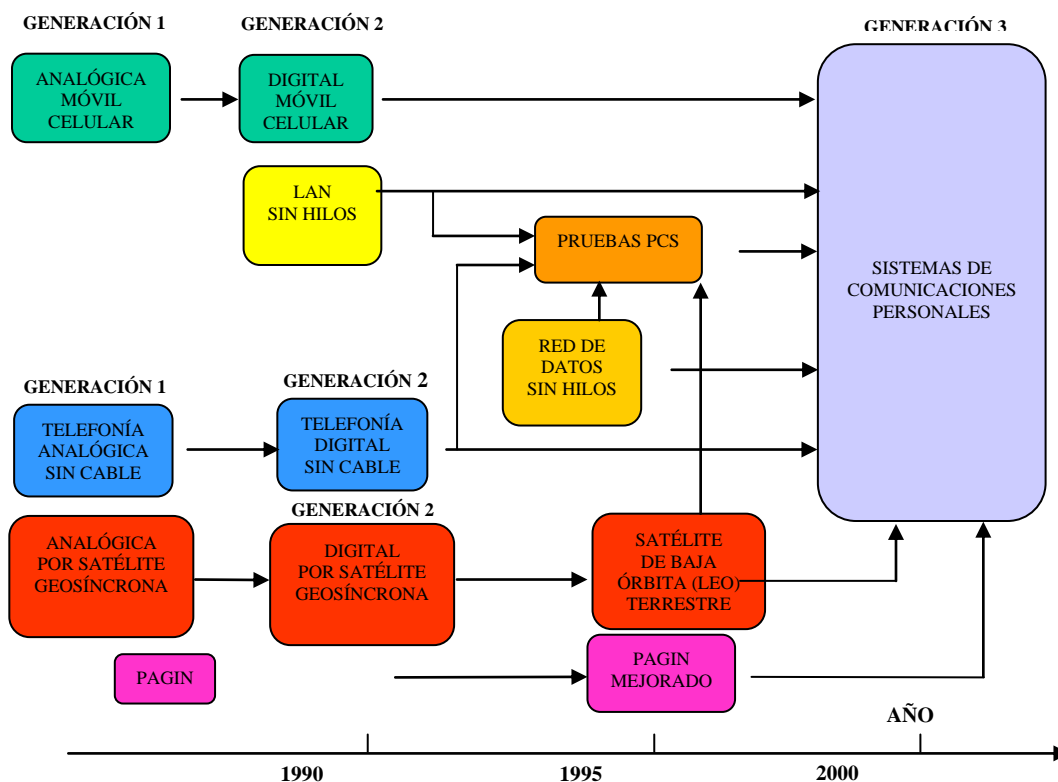
<b>ERA PIONERA</b>	
1860	Postulación de las ondas Electromagnéticas por James Maxwell.
1880	Demostración de la existencia de las ondas por Henry Rudolf Hertz.
1890	Primera patente de los sistemas inalámbricos por Guglielmo Marconi.
1905	Primera transmisión de voz y música vía enlace inalámbrico por Reginald Fessenden.
1912	Hundimiento del Titanic destacando la importancia de la comunicación inalámbrica sobre las vías marítimas, en los años siguientes la marina comenzó a establecer los radios de telegrafía.
<b>ERA PRECELULAR</b>	
1921	El Dpto. de la Policía de Detroit dirige maniobras militares con radios móviles.
1933	En EUA, existen 4 canales en los 30-40 Mhz.
1938	En EUA, se reglamenta el servicio regular.
1946	Primer comercio de los sistemas de teléfonos móviles operados por el sistema Bell, en EUA.
1948	Primer comercio plenamente automático de teléfonos móviles en EUA.
1950	Los teléfonos y los enlaces de microondas son desarrollados.
1960	Introducción de líneas interurbanas a los sistemas de radio con canales automáticos en EUA.
1970	Los sistemas de teléfonos móviles operan en muchas ciudades. Lo utilizaban 100 millones de vehículos.
<b>ERA CELULAR</b>	
1980	Distribución de los sistemas celulares analógicos por el mundo.
1990	Distribución de los celulares digitales y modo de operación dual de los sistemas digitales.
2000	Distribución de los servicios multimedia a través de Sistemas de Telecomunicaciones Móviles Terrestres Públicos Futuros (FPLMTS - ), IMT-2000, Sistema Universal de Telefonía Móvil (UMTS - -Universal Mobile Telephone System).
2010	Ancho de banda para Comunicación inalámbrica que soporten redes B-ISDN y ATM.
2010 +	Radio sobre fibra (así como micro celdas sobre fibra óptica).

**Tabla 1.1** La Era Inalámbrica.

La próxima generación de PCS, así como los FPLMTS necesitarán proporcionar la transmisión multimedia de voz, datos y vídeo (tales como en aplicaciones de informática móvil, servidores web móviles) y una interconexión eficiente sobre grandes distancias a través de una infraestructura de banda ancha, mientras que por el otro lado los usuarios de Redes de Servicio Digital Integrado (ISDN – Integrated Services Digital Network) de banda ancha demandarán capacidad de acceso nómada a las redes de banda ancha basadas en Modos de Transferencia Asíncronos (ATM – Asíncrono Transference Modes), en cualquier lugar y en cualquier momento. Se espera que las nuevas soluciones tecnológicas hagan posible que las comunicaciones multimedia sin hilos sean una realidad pronta.

El desarrollo de una red global para las comunicaciones personales multimedia (Red de Comunicaciones Personales (PCN - Network Communications Personal)) con terminales individuales pequeñas de costo bajo es uno de los proyectos más ambiciosos actuales a nivel mundial. En el desarrollo de este sistema PCN juegan un papel fundamental constelaciones de satélites de Órbitas Bajas y Medias Terrestres (GEO – Geoestacionary Earth Orbits, MEO – Médium Earth Orbits, LEO – Low Earth Orbits), GEO-estacionarias y PCN, para proporcionar cobertura a nivel mundial para la mayoría de los servicios necesitados por un usuario final. Se espera que un usuario pueda llamar desde terminales de bajo peso, tamaño y costo, proporcionando tanto servicios de voz como enlaces de video y datos con cobertura mundial e integración completa en la red terrestre. Esta meta ambiciosa necesita la integración de redes heterogéneas, que hayan sido diferentes hasta ahora, ampliando, supliendo y posiblemente uniendo los sistemas celulares terrestres tradicionales con redes de satélites globales y sistemas inalámbricos de interior.

La Figura 1.3 muestra gráficamente la convergencia de los diferentes sistemas de comunicaciones sin hilos hacia los Servicios de Comunicación Personal.



**Figura 1.3** Evolución de los Sistemas de Comunicación Personal.

## ***FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIÓN PERSONAL INALÁMBRICOS***

El sistema de radio celular público tiene menos de dos décadas de existencia. Los conceptos de radio celular son más viejos, se iniciaron en los años 40, cuando la tecnología estaba lejana y además inmadura para soportar aquellos sistemas complejos.

Hay dos componentes principales en los sistemas móviles de radio. La interfase de radio, el cual permite que los usuarios establezcan comunicaciones vía radio desde una Estación Móvil (MS – Mobile Station) a otro componente, y una red fija que se interconecta con una Red Pública de Teléfonos Swicheada (PSTN – Network Telephone Switching Public) o una Red de Servicios Digitales Integrados (ISDN – Integrated Services Digital Network ). Los sistemas de comunicaciones de radios móviles privados han estado presentes durante todo este siglo, ha sido ejemplificado por la marina, la policía y los servicios militares. Lo que hace complejo a los radios celulares públicos, es la estructura de control que facilita la red para conocer donde está localizada una MS y para el rastreo en el caso que el MS esté haciendo una llamada, con la condición que el equipo móvil este encendido.

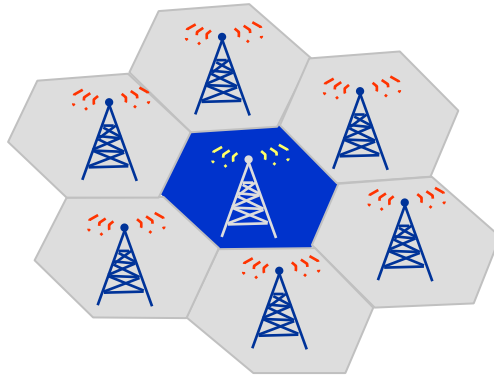
Los mecanismos de control hacen posible que a través de los protocolos se facilite el registro de las estaciones móviles en la red, facilitando las llamadas set-up y clear-down entre los switches de los MS y las Estaciones Base (BS – Base Station) así estén viajando, controlando el nivel de energía irradiada, proporcionando seguridad (en algunos sistemas), y ejecutando un gran número de otras funciones vitales.

Sin embargo, el número de usuarios que la red puede soportar, depende fundamentalmente de una Interfase de Área Común (CAI – Interfase Area Common) sobre la cual se comunican los usuarios. La capacidad de los usuarios depende de muchos factores, pero el punto principal es la cantidad del espectro asignado por los reguladores, el tamaño del área de cobertura del radio desde una BS, y la cantidad de interferencia que el enlace de un radio particular pueda tolerar.

Antes de la invención de las células, se usaban radioteléfonos que transmitían hacia una antena central en cada ciudad con 25 canales disponibles. Las desventajas de este sistema eran que exigían transmisores muy potentes, o al menos, lo suficiente para transmitir a 60 o a 80 Km. Esto implicaba un sistema muy caro y frecuencias insuficientes.

En las décadas de los 70's y los 80's fue inventado el sistema de células. La gran idea del sistema celular es la división de la ciudad en pequeñas células o celdas. Esta idea permite la reutilización de frecuencias a través de la ciudad, con lo que miles de personas pueden usar los teléfonos al mismo tiempo. Las celdas son normalmente diseñadas como hexágonos, en una gran rejilla de hexágonos, como se muestra en la figura 1.4.

Cada celda tiene una estación base que consiste de una torre y un pequeño edificio que contiene el equipo de radio. Cada celda en un sistema análogo utiliza un séptimo de los canales de voz disponibles.



**Figura 1.4** Esquemática de las celdas.

Las estaciones bases están situadas dependiendo del máximo rango en que puedan ser acomodadas. Este rango depende de las características físicas del ambiente; las frecuencias de programación y el beneficio de la antena; y las características específicas del equipo para ser desplegado. Como la capacidad no es importante, en este escenario son utilizados grandes grupos, que proporcionan una insignificante interferencia. Esta interferencia proviene de grupos vecinos de móviles que usan el mismo canal.

Una celda, más las seis celdas que la rodean en un arreglo hexagonal, deben utilizar un séptimo de los canales disponibles para que cada celda tenga un grupo único de frecuencias y no haya colisiones:

- ◆ Un proveedor de servicio celular típicamente recibe 832 radio frecuencias para utilizar en una ciudad.
- ◆ Cada teléfono celular utiliza dos frecuencias por llamada, por lo que típicamente hay 395 canales de voz por portador de señal (las 42 frecuencias restantes son utilizadas como canales de control).
- ◆ Por lo tanto, cada celda tiene alrededor de 56 canales de voz disponibles.

En otras palabras, en cualquier celda, pueden hablar 56 personas en sus teléfonos celulares al mismo tiempo. Cuando un usuario pasa de una célula a otra deja la frecuencia que estaba utilizando, para el uso de otro celular, y toma la frecuencia libre de la célula a la que pasó. Con la transmisión digital, el número de canales disponibles aumenta. Por ejemplo el sistema digital TDMA puede acarrear el triple de llamadas en cada celda, alrededor de 168 canales disponibles simultáneamente.

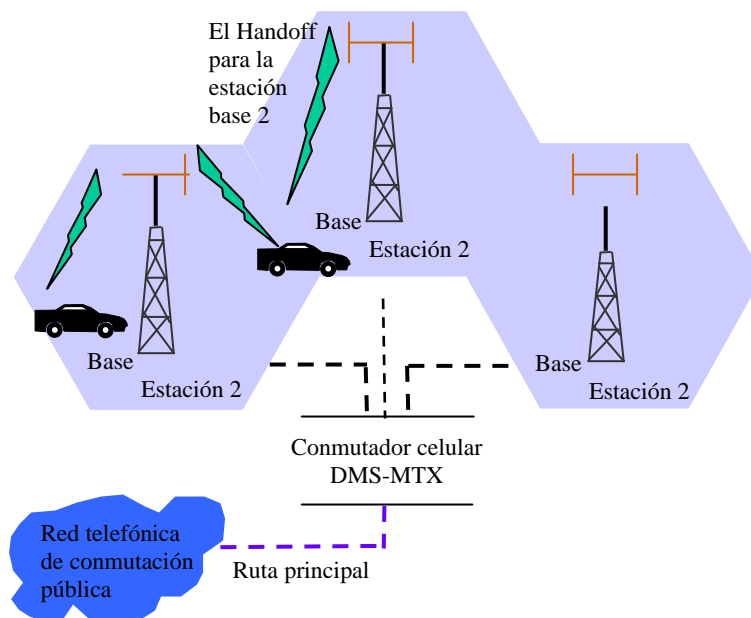
Los teléfonos celulares tienen dentro transmisores de bajo poder. Muchos teléfonos celulares tienen dos intensidades de señal: 0.6 watts y 3.0 watts (en comparación, la mayoría de los radios de banda civil transmiten a 4 watts.) La estación central también transmite a bajo poder.

Los transmisores de bajo poder tienen dos ventajas:

- ◆ Las transmisiones de la base central y de los teléfonos en la misma celda no salen de ésta. Por lo tanto, cada celda puede re-utilizar las mismas 56 frecuencias a través de la ciudad.
- ◆ El consumo de energía del teléfono celular, que generalmente funciona con baterías, es relativamente bajo. Una baja energía significa baterías más pequeñas, lo cual hace posibles los teléfonos celulares.

La tecnología celular requiere un gran número de bases o estaciones en una ciudad de cualquier tamaño. Una ciudad grande puede llegar a tener cientos de torres. Cada ciudad necesita tener una oficina central la cual maneja todas las conexiones telefónicas a teléfonos convencionales, y controla todas las estaciones de la región.

La transición del enlace de comunicación de una estación base a otra, aledaña, se conoce como “handoff”; en la figura 1.5 se muestra un esquema de lo que es el “handoff”.



**Figura 1.5** Esquema del handoff.

El sistema CDMA define diferentes procesos de “handoff”, que se explican a continuación.

El primero es el “soft handoff” o “handoff de software”. Durante el “handoff”, un móvil mantiene, simultáneamente, conexión con dos o tres estaciones base. Cuando el móvil se mueve de su célula actual (fuente) a la siguiente célula (objetivo), siempre se mantiene una conexión de canal de tráfico con ambas células. En el enlace de bajada, el móvil usa el receptor múltiple o “rake receiver” para demodular dos señales separadas de dos estaciones base diferentes. Las dos señales se combinan para obtener una señal compuesta de mejor

calidad. En el enlace de subida, la señal que transmite el móvil se recibe por ambas estaciones base. Las dos células demodulan la señal por separado y envían las tramas demoduladas al Centro de Conmutación Móvil (MSC Mobile Switching Center). El MSC contiene un selector que obtiene la mejor trama de las dos.

El segundo es el “softer handoff”. Este tipo de “handoff” ocurre cuando un móvil hace una transición entre dos sectores de la misma célula. En el enlace de bajada, el móvil mejora la misma clase de combinación de proceso que el “soft handoff”. En este caso, el móvil usa su receptor múltiple para combinar las señales recibidas de los dos sectores. En el enlace de subida, sin embargo, dos sectores de la misma célula reciben simultáneamente las dos señales del móvil. Estas señales son demoduladas y combinadas dentro de la célula, de tal forma que únicamente se envía una trama al MSC.

El tercero es el “hard handoff” o “handoff de hardware”. El sistema CDMA hace dos tipos de “hard handoffs”. Un “handoff CDMA-a-CDMA” ocurre cuando el móvil hace una transición entre dos portadoras CDMA (por ejemplo, dos canales de espectro esparcido que están centrados en diferentes frecuencias). Este “hard handoff” ocurre también cuando el móvil hace una transición entre dos sistemas diferentes de operadores. Al “handoff CDMA-a-CDMA” también se le llama “D-a-D handoff”. Y el “handoff CDMA-a-analógico” ocurre cuando una llamada CDMA se guía a una red analógica. Esto puede ocurrir cuando el móvil viaja en un área donde hay servicio analógico pero no hay servicio CDMA. El “handoff CDMA-a-analógico” se le llama “handoff D-a-A”.

Antes de describir el proceso de “soft handoff” en detalle, es importante notar que cada sector en un sistema CDMA se distingue de cualquier otro por su canal piloto. El canal piloto es uno de los cuatro canales -piloto, ‘paging’, ‘sync’ y canales de tráfico- en el enlace de bajada. El canal piloto sirve como un “faro” para el sector y ayuda al móvil a adquirir otros canales lógicos del sector. El piloto no contiene información más que en el código corto Pseudo Ruido (PN - Pseudo Noise).

Se usa un término especial para describir la Relación Señal a Ruido (SNR – Relation Noise Signal) del canal de piloto: energía por chip por densidad de interferencia, o  $E_c/I_0$ . La energía por chip  $E_c/I_0$  es diferente de la energía por bit  $E_b$  en que “chips” se refiere a los bits en las secuencias esparcidas PN. Dado que no hay información en banda base contenida en el canal de piloto, el piloto no pasa por el proceso opuesto al esparcimiento y estos bits no se recobran.

El móvil constantemente notifica a la estación base las condiciones de la propagación local; la estación base hace uso de esta información para tomar decisiones sobre el “handoff”. Este “Handoff” de Asistencia Móvil (MAHO - Mobile-Assisted Handoff) actúa cuando el móvil toma una medida del  $E_c/I_0$  del enlace de bajada y reporta el resultado de la medida a la estación base. Dado que cada estación base transmite su propio piloto en un diferente “offset” PN, el  $E_c/I_0$  de un piloto da una buena indicación de si un sector en particular puede o no ser el sector más apropiado para servir al móvil.

En el manejo del proceso de “handoff”, el móvil mantiene en su memoria cuatro listas que se excluyen entre sí compuestas por los sectores de las estaciones base. A estas listas también se les llama conjuntos.

Los cuatro conjuntos son:

- 1) Conjunto activo (“active”).
- 2) Conjunto candidato (“candidate”).
- 3) Conjunto vecino (“neighbor”).
- 4) Conjunto residuo (“remaining”).

### **Conjunto activo**

Contiene los pilotos de aquellos sectores que se están comunicando con el móvil en los canales de tráfico. Si el conjunto activo contiene únicamente un piloto, entonces el móvil no está en “soft handoff”. Si el conjunto activo contiene mas de un piloto, entonces el móvil mantiene la conexión con todos esos sectores en canales de tráfico separados. La estación base controla esencialmente el proceso de “handoff” porque se puede agregar únicamente un piloto al conjunto activo si la estación base envía un “mensaje de dirección de handoff” (“handoff direction message”) al móvil y el mensaje contiene el piloto en particular que se va a agregar al conjunto activo. El conjunto activo puede contener a lo más seis pilotos.

### **Conjunto candidato**

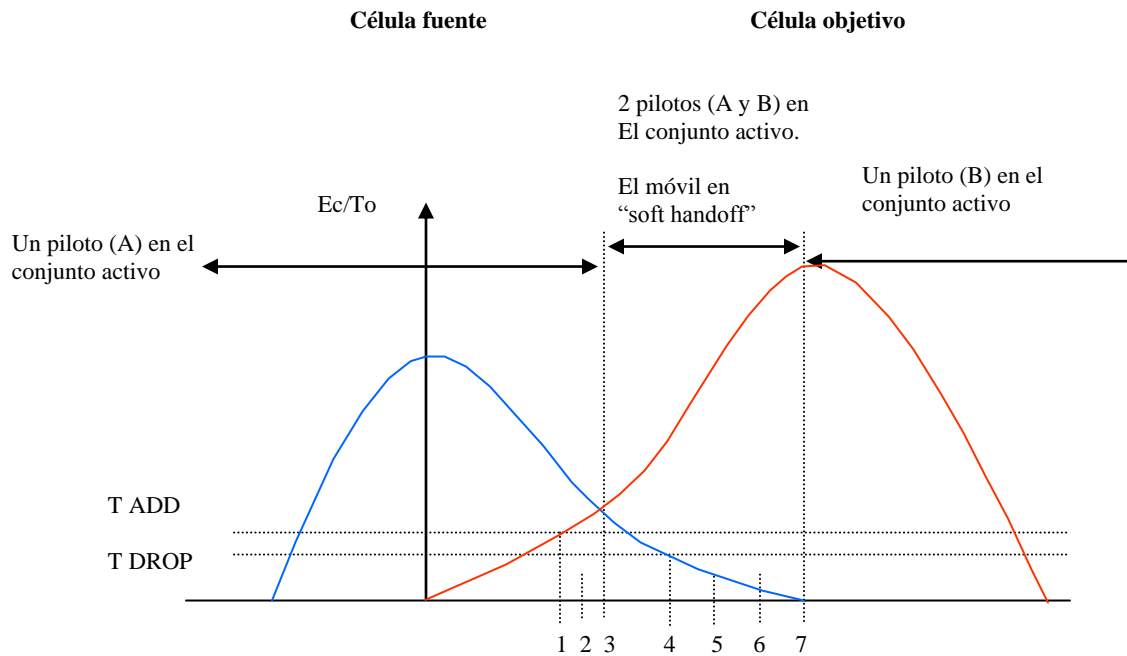
Contiene aquellos pilotos cuyos  $E_c/I_0$  son suficientes para hacerlos candidatos de handoff. Esto significa que si el  $E_c/I_0$  de un piloto en particular es más grande que el umbral de detección de piloto (“pilot detection threshold”) “T\_ADD”, entonces ese piloto se agrega al conjunto candidato. El conjunto candidato solo puede contener seis pilotos.

### **Conjunto vecino**

Contiene aquellos pilotos que están en la lista vecina del actual sector servidor del móvil. El conjunto vecino contiene a lo más 20 pilotos.

### **Conjunto residuo**

Contiene todos los posibles pilotos en el sistema para esta frecuencia portadora, excluyendo a los pilotos que están en los conjuntos activo, candidato y vecino. A continuación se muestra en la figura 1.6 el proceso que sigue una llamada para entrar en “handoff”:



**Figura 1.6** Proceso de una llamada para entrar en handoff.

1. En primera instancia el móvil se encuentra alimentado únicamente por la célula fuente, y su conjunto activo contiene tan solo al piloto A (célula fuente). El móvil mide el nivel de  $E_c/I_0$  del piloto B (célula objetivo) y si lo encuentra mayor que "T\_ADD", el móvil envía un mensaje de medida de fuerza de piloto ("pilot strength measurement message") y transfiere al piloto B del conjunto vecino al conjunto candidato.
2. Ahora el móvil recibe un "mensaje de dirección de handoff" ("handoff direction message") de la célula fuente. Dicho mensaje ordena al móvil a comenzar la comunicación en un nuevo canal de tráfico con la célula objetivo. El mensaje contiene el "PN offset" de la célula objetivo y el código de Walsh del nuevo canal de tráfico.
3. Entonces el móvil mueve el piloto del conjunto candidato al conjunto activo. En este momento el móvil envía un "mensaje de acabado de handoff" ("handoff completion message") inmediatamente después de adquirir el canal de tráfico de bajada especificado en el "mensaje de dirección de handoff" ("handoff direction message"). Ahora el conjunto activo contiene dos pilotos en su lista.
4. Después de que tiene dos pilotos, el móvil detecta que el piloto A, ha caído por debajo de "T\_DROP" y es entonces cuando el móvil inicia el contador de tiempo (drop timer).



5. Cuando el “drop timer” alcanza el valor correspondiente a “T\_TDROP” el móvil envía un mensaje de medida de fuerza de piloto (“pilot strength measurement message”).
6. Una vez que el móvil recibe un “mensaje de dirección de handoff”, el mensaje contiene únicamente el PN offset de la célula objetivo.
7. Y finalmente el móvil tiene que cambiar el piloto fuente del conjunto activo al conjunto vecino, así como enviar un mensaje para indicar que el “handoff” ha terminado.

En los sistemas modernos, el teléfono móvil recibe una identificación del sistema del operador al encenderse. Si en ese momento, el teléfono móvil detecta que la identificación del sistema no es la de su operador, es porque esta en “roaming”; es decir, esta usando los servicios de otro operador; con lo cual se puede usar un teléfono móvil en diferentes países.

Cuando es encendido, el móvil también transmite un pedido de registro, con lo cual, la red no tendrá problemas para encontrar al móvil.

Los PCS son frecuentemente diferenciados de la telefonía celular, porque proporcionan servicios a cada uno, donde quiera, además proporcionan gran capacidad de la red, cobertura omnipresente, pocos equipos, bajos costos de infraestructura y facilidades de desarrollo de las BS. Las microceldas son usadas en los sistemas celulares, de tal manera que el tamaño y el costo son reducidos. Las BS son pequeñas y no tan costosas para los sistemas sin cable como es el caso de los sistemas de telecomunicaciones sin cables europeos (CT-2) y los Sistemas de Telecomunicaciones Digital inalámbricos Mejorados (DECT – Digital Enhanced Cordless Telecommunications ), pero estos no son diseñados para redes celulares ni para aquellos que suministran alta capacidad de requerimiento para los PCS.

Las macroceldas convencionales son interconectadas a centros móviles típicamente configurados inicialmente con las facilidades de una vía de transmisión estándar, como lo es de 1.5 Mbits/seg (estándar norteamericano, T1) o 2 Mbits/seg (estándar europeo, E1) de enlace.

La interconexión de microceldas es y será completamente diferente. Algunas microceldas son esencialmente "Sitios de Radiación Remota", donde los RF o IF de señales de radio móviles son transmitidos a través de un enlace óptico, o un enlace de radio punto a punto, para una distribución puntual de microondas que actúa como el centro físico de una microcelda.

Situando una BS en los sistemas de primera y segunda generación, involucra el uso relativo de herramientas de planeación, para predecir la cobertura de radio de la posición de una BS con errores de pérdida de ruta que a menudo exceden 20 dB y usualmente requieren soportar la propagación de las medidas y encontrar dueños que permitan rentar sus propiedades para el despliegue de la BS. Las herramientas de predicción para el piso de las microceldas son más exactas, por la condición de que las antenas de las BS deben estar

montadas por debajo del horizonte de la ciudad. La propagación de la microonda en la microcelda es esencialmente determinada por la topología de las calles y edificios y además las microceldas son irregulares si las calles son irregulares.

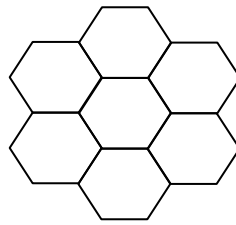
## ***TÉCNICAS DE ACCESO***

### ➤ **“AMPS - Advanced Mobile Phone Service ”**

El AMPS fue desarrollado en los Laboratorios Bell a mediados de los 70's. Después de haber implantado un servicio de prueba de un sistema completamente celular en Chicago en 1978, el primer sistema comercial en los EUA entro en operación en 1982 y 1983.

### Arquitectura del Sistema

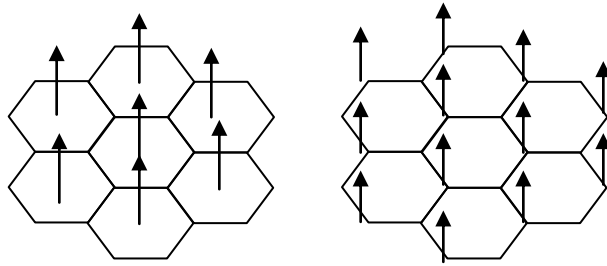
AMPS usa una red sitios de células “cell-sites” y oficinas de conmutación “switching offices” que funcionan como interfaz para conectarse con la red de línea de tierra “landline” del sistema de telefonía existente y los móviles. Usa el concepto celular (Propuesto por primera vez en los laboratorios Bell por D. H. Ring en 1947), como se muestra en la figura 1.7, con células hexagonales para dividir el área total de los sistemas sin traslape.



**Figura 1.7** Concepto celular.

### Cell-Sites

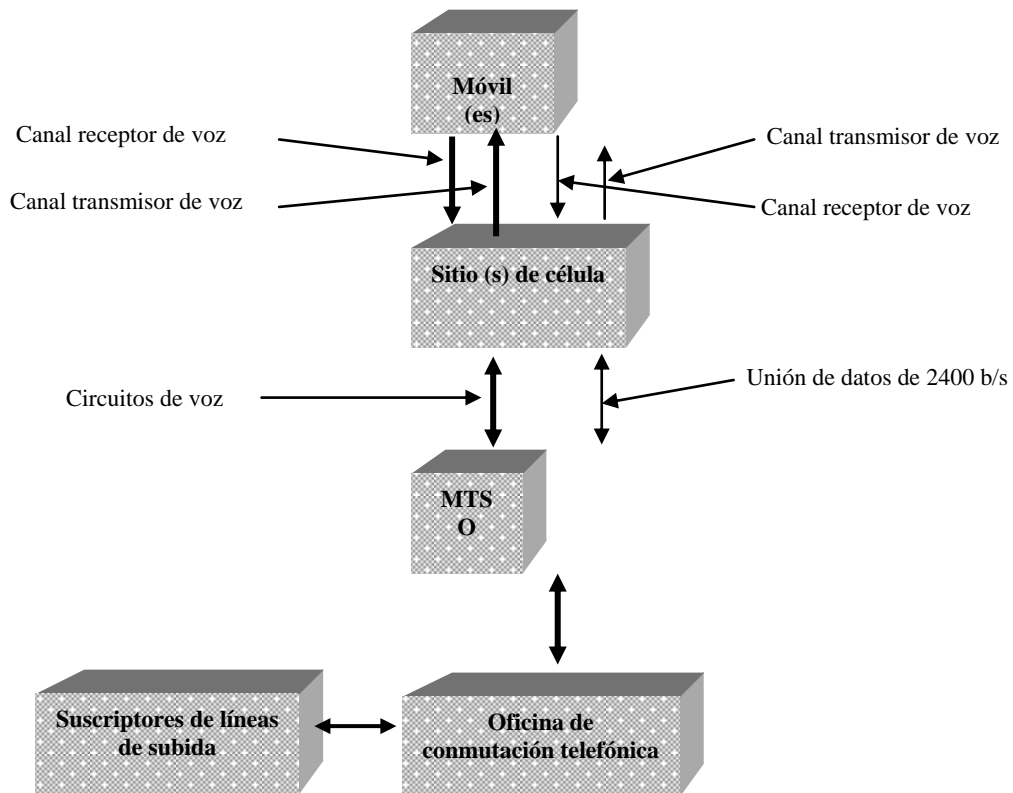
Los “cell-sites” fueron posicionados en el centro de la célula (cuando empezaba el sistema) y sobre esquinas alternadas de la célula como se muestra en la figura 1.8. Estos sitios de células cubrían a los usuarios móviles de estas específicas celdas en las cuales ellos estaban presentes. Cuando el sistema se fue madurando, cada sitio de célula presente sobre la esquina alterna de la célula usó antenas direccionales con un ancho de haz de 120° para iluminar porciones de las tres células adyacentes que conocían el sitio de célula. Este arreglo proveía una diversidad de radiación espacial y permitía la protección de una señal más uniforme en la presencia de obstáculos como edificios, colinas, etc. El uso de antenas direccionales más que omnidireccionales proveía una relación señal a ruido de 4 – 5 dB.



**Figura 1.8** Cell – Sites (the start-up and the mature systems).

“Mobile Telecommunications Switching Office (MTSO)”

Los sitios de células fueron interconectados con la Oficina de Conmutación de las Telecomunicaciones Móviles (MTSO - Mobile Telecommunications Switching Office) por medio de cables. Los troncales que trabajaban a la frecuencia de voz acarrearon las llamadas de voz y había ligas de conexión de datos de 2.4 KPSS entre las MTSO y cada uno de los sitios de células para propósitos de señalización. En la figura 1.9 se muestran los elementos de la red móvil.



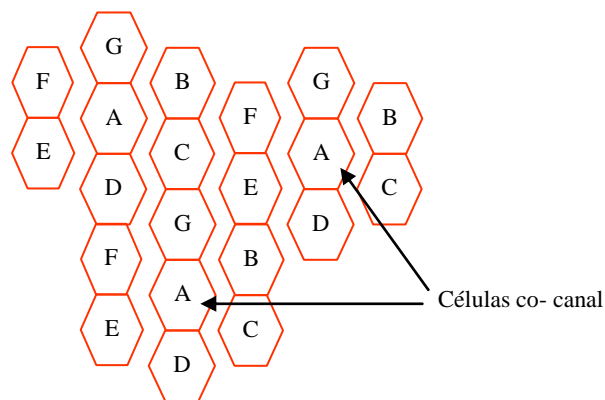
**Figura 1.9** Elementos de la red móvil.

### Frecuencia de Operación

El sistema AMPS usó un ancho de banda del sistema total de 40 MHz en la banda de los 800 MHz (como se ubicó por la FCC) con 20 MHz del sitio de célula a la comunicación móvil (liga hacia abajo, “downlink”) y 20 MHz del móvil al sitio de célula (liga hacia arriba, “uplink”). Los canales “uplink” usaron la banda de frecuencia de 870-890 MHz y los canales “downlink” usaron la banda de frecuencia de 825-845 MHz. Cada canal consta de un par de caminos separados por 45 MHz. La modulación en frecuencia se utilizó para la comunicación y el ancho de banda por canal fue de 300 Khz. con una desviación de frecuencia máxima de 12 Khz. Esto proporciono un total de 666 canales duplex disponibles para el sistema.

### Frecuencia de Reuso

El sistema AMPS uso el concepto de la frecuencia de rehúso en las comunicaciones celulares, donde, el número total de células es dividido dentro de “clusters” y a cada célula dentro del “cluster” le serán asignadas frecuencias, las cuales son distintas y no interfieren con las frecuencias de las células adyacentes. El mismo patrón de asignamiento de canales es repetido en los “clusters” adyacentes. En tamaño mínimo de un “cluster” (N) fue determinado de acuerdo a las condiciones de interferencia co-canal y fue directamente relacionado a una parámetro llamado la relación  $d / r$ , donde ‘d’ es la distancia entre las células las cuales reusan los mismos canales y ‘r’ es el radio de la célula. Un valor de  $d / r = 4.6$  [Adm.] fue encontrado adecuado para antenas direccionales y  $d / r$  de 6.0 [Adm.] fue requerido para antenas omnidireccionales para mantener una relación señal a ruido de 17 dB requerida para una buena calidad de trasmisión. Esto corresponde a una valor de  $N = 7$  (para antenas direccionales) y  $N = 12$  (para antenas omni-direccionales) el cual fue utilizado como el tamaño de un “cluster” en el sistema AMPS, ver figura 1.10.



**Figura 1.10** El concepto de rehúso de frecuencia y agrupación de células (para  $N=7$ ).

### División de Célula

En áreas donde la densidad de tráfico es muy alta, nuevas células pueden ser agregadas entre los sitios de células ya existentes para obtener un nuevo patrón de células con la mitad de dimensión lineal que los sitios de células originales. La división de células en este patrón incrementa el número de canales, desde que las células pequeñas pueden aguantar muchos canales y largos, manteniendo la misma relación  $d / r$ . Asignando apropiadamente las frecuencias de radio de canal, en sistema AMPS puede permitir la coexistencia de células largas y pequeñas. Cuando el crecimiento de un cliente se incrementa, las células pequeñas pueden ser subdivididas más para incrementar la capacidad del sistema. La eficiencia del espectro fue alcanzada en el sistema AMPS por este método, bajo el costo del incremento y el número de sitios de células requeridos para un área particular.

### Canales de Control

Hay dos tipos de canales de control:

1. “Paging” – Usado para determinar si un móvil estaba disponible para recibir una llamada entrante.
2. “Access” – Usado para la función de hacer una llamada originada desde un móvil o para responder a una señal “paging”.

Los 21 canales más altos son siempre usados para “paging” y “access” y hay un factor de reuso de  $N$  para controlar también los canales, el cual es, en general, diferente de los canales de voz. Esta frecuencia del factor de reuso varía de ciudad en ciudad y es transmitida a todos los móviles sobre los canales de configuración. Pero cuando el sistema crece, el número de canales de “access” y “paging” será incrementado para manejar la capacidad de tráfico.

### Capacidad del Sistema

Con un total de 666 canales duplex (40 MHz/ 60MHz) disponibles, podemos calcular la capacidad del sistema como sigue:

- Caso omnidireccional. Con cada “cluster” teniendo 12 células, el número de canales por célula es aproximadamente 56.
- Caso antena direccional 1200. Con cada “cluster” teniendo 7 células, el número de canales por célula es aproximadamente 96. Cada antena direccional ahora maneja 32 canales.

Es importante notar que esta capacidad incluye también los canales de control. Para calcular la capacidad debida a los canales de voz exclusivamente, podemos asumir que los 21 canales más altos son siempre usados para propósitos de control y proceder a derivar la nueva capacidad con 54 canales para el caso omnidireccional y 92 canales para el caso de las antenas direccionales 1200.

## ➤ “GSM - Global System for Mobiles”

Es un sistema estándar para comunicación utilizando teléfonos móviles que incorporan tecnología digital. Es la evolución tecnológica de los sistemas de comunicación móvil.

### Servicios GSM

#### ▪ *SMS – “Short Messaging Services”*

El Servicio de Mensajería Corto (SMS – Short Messaging Services) sirve para enviar y recibir mensajes de texto de y hacia teléfonos móviles. El texto puede estar compuesto de palabras o números o una combinación de caracteres alfanuméricos. SMS fue creado como parte de la fase 1 estándar de GSM. El primer mensaje corto se cree que ha sido enviado en diciembre de 1992 de una Computadora Personal (PC – Computer Personal) a un teléfono móvil sobre la red GSM Vodafone en Ucrania. Cada mensaje corto esta arriba de los 160 caracteres de tamaño cuando se utiliza el alfabeto Latín y 70 caracteres cuando se utilizan alfabetos que no son latinos como el arábico y el chino.

#### ▪ *“Call waiting & Call hold”*

Si estas usando el teléfono, el servicio de “call waiting” te alertará de una segunda llamada. Con ésto no perderás una llamada que esté por entrar.

Con el servicio “Call Hold” puedes poner a una persona que este hablando contigo en espera de manera que puedas realizar otra llamada y entonces puedas cambiar entre las dos llamadas.

#### ✓ *“Call forwarding”*

El servicio de reenvío de llamadas se usa para poder redireccionar una llamada entrante de un teléfono hacia un teléfono con un número distinto.

#### ✓ *“CLI - Calling line identity”*

El servicio de identidad de la línea que llama despliega el número de la llamada entrante.

#### ✓ *Servicios de Datos*

El empleo de un teléfono GSM para enviar y recibir datos es el bloque esencial para el acceso móvil a Internet y la transferencia móvil de datos. Actualmente GSM tiene una transferencia de datos de 9.6 KPSS. Los nuevos desarrollos tecnológicos que aumentarán las velocidades de transferencia de datos para los usuarios de GSM son Datos Conmutados con Circuitos de Alta Velocidad (HSCSD - High Speed Circuit Switched Data) y Servicios de Radio Paquete General (GPRS - General Packet Radio Service).

### “WAP - Wireless Application Protocol”

WAP es simplemente un protocolo, la manera estandarizada de cómo un teléfono móvil habla a un servidor instalado en la red de teléfonos móviles.

WAP es un intento por definir un estándar sobre como el contenido de la Internet es filtrado a las comunicaciones móviles. WAP fue desarrollado para ser la manera de hacer disponible el contenido del Internet a las terminales móviles. Una de las razones por las que la industria móvil se ha emocionado con WAP es porque combina 2 de las más grandes industrias en crecimiento: la inalámbrica y el Internet.

El Protocolo de Aplicación Inalámbrica está proyectado como un protocolo escalable diseñado para ser usado con:

- Cualquier teléfono móvil de estos con una línea de “display” a un teléfono inteligente (Teléfonos móviles con acceso a Internet).
- Cualquier servicio existente o planeado como SMS, Data, USSD (Unstructured Supplementary Services Data) y GPRS.
- Cualquier estándar de red móvil como CDMA, GSM o UMTS.
- Terminales de entrada múltiple con teclados “touch-screens” y otros.

El WAP incorpora un “micro-browser” relativamente simple en el teléfono móvil. WAP apunta ha cambiar los teléfonos móviles del mercado a “teléfonos inteligentes basados en red”.

#### *Desventajas*

- ◆ Es complicado configurar teléfonos WAP para los nuevos servicios con WAP, con 20 o más parámetros diferentes que necesitan ser introducidos para obtener el acceso a los servicios WAP.
- ◆ Comparado con la base instalada de los teléfonos fáciles de manejar SMS, el número relativo de teléfonos que soportan WAP es pequeño. WAP es un protocolo que corre sobre la parte más alta de un portador esencial. Ninguno de los portadores existentes GSM para WAP, SMS, USSD y Datos Conmutados con Circuitos (CSD - Circuit Switched Data) están optimizados para WAP.
- ◆ El estándar WAP esta incompleto, con elementos claves como “Push” (envió proactivo de información a los dispositivos móviles) y telefonía inalámbrica (actualizando los reportes de direcciones y el cómo) incluido en el WAP 1.2, estandarizado después de 1999.

#### El Stack de protocolos WAP

WAP tiene una estructura por capas como se muestra en la tabla 1.2.

WAE	Wireless Application Environment
WSP	Wireless Session Protocol
WTP	Wireless Transaction Protocol
WTLS	Wireless Transport Layer Security
WDP	Wireless Datagram Protocol
	Bearers e.g. Data, SMS, USSD

**Tabla 1.2** Estructura por capas del WAP.

### GPRS

El sistema GPRS, que representa un pago por volumen de datos transferidos y no por tiempo de conexión, se convertirá en "un paso intermedio antes de la consolidación de la tercera generación de móviles".

#### ➤ “CDMA - Code Division Multiple Access”

La tecnología CDMA genérica aparece como la base tecnológica por excelencia de la próxima generación de comunicaciones móviles de tercera generación, habiendo entrado ya en la presente segunda generación; de hecho, la tendencia global en la industria es la adopción de las tecnologías CDMA. CDMA que proporciona mejores prestaciones que las tecnologías celulares convencionales tanto en calidad de las comunicaciones como en privacidad, capacidad del sistema y flexibilidad y, por supuesto en ancho de banda.

CDMA es una tecnología genérica que puede describirse, a groso modo, como un sistema de comunicaciones por radio celular digital que permite que un elevado número de comunicaciones de voz o datos simultáneos compartan el mismo medio de comunicación, es decir; utilizan simultáneamente un “grupo” común de canales de radio, de forma que cada usuario puede tener acceso a cualquier canal. El canal es un trozo del espectro de radio que se asigna temporalmente a un tema específico, como, por ejemplo, una llamada telefónica.

Con base a esto se observa que CDMA es una técnica de acceso múltiple. En CDMA, cada comunicación se codifica digitalmente utilizando una clave de encriptación que solamente conocen los terminales involucrados en el proceso de comunicación y únicamente durante



la duración de la comunicación. La codificación digital y la utilización de la técnica de espectro esparcido, otra característica inherente a CDMA se pueden considerar como los puntos de identificación de la tecnología CDMA.

### *El escenario de enfoques / normas en CDMA.*

Dentro de esta tecnología genérica CDMA existe una variedad de diferentes enfoques generados por empresas y / o asociaciones que constituyen el abanico de opciones para implantar sistemas ya operativos; estos enfoques están estrechamente asociados al tema de las normas ya que los diferentes enfoques compiten para constituir normas. Existen dos enfoques / normas fundamentales dentro de la tecnología genérica CDMA, los dos de banda ancha y que constituyen las dos opciones en cuanto a elección: Ancho de banda CDMA (W-CDMA – Wideband CDMA) y CDMA2000, que proviene, esta última de CDMAOne (IS-95 CDMA, el CDMA de la segunda generación). W-CDMA aparece con importantes expectativas no solo en Estados Unidos sino también en Europa donde UMTS constituye la versión europea de la norma W-CDMA. Desde un punto de vista de trayectoria evolutiva W-CDMA aparece más fuertemente asociado a Japón y Europa, mientras que Estados Unidos aparece asociado a CDMA2000, fundamentalmente porque CDMA en su forma CDMAOne es una tecnología de segunda generación bien establecida en Estados Unidos; sin embargo, las tendencias en Estados Unidos apuntan a un posible desplazamiento hacia W-CDMA. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU - International Telecommunication Union) ha aprobado a cantidad considerable de especificaciones para velocidades de datos y requisitos hacia la tercera generación lo que aumenta las posibilidades de movimiento.

CDMA2000 utiliza la misma tecnología subyacente y espectro de radio que CDMAOne, con lo cual el proceso de migración de CDMAOne a CDMA2000 aparece suficientemente viable. En este proceso de migración, aparecen como primera etapa intermedia CDMA2000- 1x que se inscribe en el ámbito de las tecnologías de transición hacia la tercera generación, o sea, las tecnologías conocidas como generación 2.5, donde también se encuentra GPRS cuyo origen es GSM. CDMA2000-1x, apoyado por los fabricantes coreanos Samsung, Hyundai y LG Electronics, está funcionando ya en Corea del Sur. A CDMA2000 1x le sigue, en el proceso evolutivo hacia la tercera generación, la versión CDMA2000-1xEV (1x Evolution) donde, a su vez, aparecen dos etapas: la primera dedicada solamente a datos (1xEV-DO) y la siguiente que cubre ya datos y voz (1xEV-DV).

Qualcomm, el fabricante de chips y software para móviles e infraestructuras inalámbricas y creador de CDMAOne es, obviamente, uno de los promotores de CDMA2000, pero la incertidumbre en torno a quién será el ganador, CDMA2000 o W-CDMA, hace que las diferentes compañías estén trabajando para poder funcionar con los dos sistemas. Así, la propia Qualcomm está presente en los dos enfoques, CDMA2000 y W-CDMA (W-CDMA le permitirá entrar en el mercado europeo) y por otra parte, firmas como Motorola o Lucent están trabajando en equipos para sistemas CDMA2000, así como una parte importante de los fabricantes asociados con UMTS.

El estado de la situación y el ambiente general parece indicar que W-CDMA cubrirá la mayor parte del mundo: UMTS aparece como un factor crucial en este movimiento. Sin embargo, factores como el hecho de que la tecnología CDMA2000 pueda estar disponible antes que W-CDMA o los tiempos involucrados en el despliegue de las redes pueden ayudar a inclinar la balanza en un sentido u otro. En cualquier caso, el escenario aparece aún confuso en términos de cómo se van a configurar las cuotas de mercado entre los dos contendientes: la forma y rapidez en que produzca el despliegue de las redes está fuertemente asociado a esta configuración de cuotas de mercado. También la compatibilidad entre sistemas y la cartera de servicios, dos temas perceptibles por el usuario, van a ser cruciales para el desarrollo del mercado y, por supuesto, el tema de los precios. Subyacentes a todo esto aparecen los temas puramente tecnológicos: CDMA2000 presenta mejores características en compatibilidad y facilidad para la migración (bastante más económica que W-CDMA) además de que utiliza el espectro con más eficacia ya que se pueden conseguir siete portadoras en 10 MHz frente a las dos de W-CDMA y, por otra parte, CDMA2000 utiliza el mismo espectro frente a W-CDMA que necesita nuevo espectro. Qualcomm no ha producido recortes masivos en su plantilla como ha ocurrido en el resto de la industria de telecomunicaciones y de la industria inalámbrica en particular y, por otra parte, el precio de sus acciones permanece dentro de una estabilidad razonable.

#### W-CDMA.

Este enfoque CDMA funciona como un canal CDMA cuatro veces más ancho que los canales que se están utilizando actualmente en estados Unidos de segunda generación. El japonés NTT DoCoMo es uno de los impulsores de W-CDMA: está previsto que desarrolle un sistema W-CDMA que enlace Tokio, Osaka y Nagoya, al mismo tiempo que ha formado recientemente una alianza con la empresa de software alemana SAP. Por otra parte, la inglesa Vodafone también está involucrada en W-CDMA a través de UMTS.

Se han realizado diferentes versiones de W-CDMA: la más reciente viene dada por las actuaciones en torno a los resultados de un proyecto piloto realizado en Japón y en los resultados del sistema europeo UMTS todo ello gestionado y supervisado por la Sociedad de Proyectos de Tercera Generación (3GPP - Third Generation Partnership Project); de ahí ha surgido el enfoque / norma 3GPP W-CDMA. Este enfoque emplea W-CDMA en ambos modos Doble División de Frecuencia (FDD - Frequency División Duplex) y Doble División de Tiempo (TDD - Time División Duplex). Las especificaciones W-CDMA utilizan el término Equipo Usado (UE - User Equipment) para referirse a los teléfonos móviles, ordenadores portátiles y cualquier otro equipo para acceder a un sistema W-CDMA. A diferencia de lo que ocurre en las estaciones móviles CDMA de segunda generación, en W-CDMA el UE puede transmitir más de un código de canal para que las altas velocidades involucradas puedan ser una realidad; con base a esto, el UE se puede contemplar como una especie de estación "transceiver base".

#### CDMA: tecnología

La distribución celular y la reutilización de frecuencias son dos conceptos estrechamente relacionados con la tecnología CDMA; el objetivo es realizar una subdivisión en un número importante de células para cubrir grandes áreas de servicio. En los sistemas basados en la

subdivisión celular (típicamente células hexagonales) y en el principio de reutilización de frecuencias, el nivel de prestaciones depende de modo crítico, del control de la interferencia mutua debida a la reutilización de frecuencias. En lo que concierne al concepto de reutilización, aunque hay cientos de canales disponibles, si cada frecuencia fuera asignada a una sola célula, la capacidad total del sistema sería igual al número total de canales con base al concepto de probabilidad de Erlang, lo cual originaría que el sistema pudiera albergar solamente a unos pocos miles de abonados. Mediante la reutilización de canales en un gran número de células, el sistema puede crecer sin límites geográficos. Desde un punto de vista de distribución celular, la tecnología CDMA se puede contemplar como una superación de la tradicional subdivisión celular hexagonal.

CDMA se fundamenta en la técnica de espectro esparcido / disperso (“Spread Spectrum”), una técnica que se ha estado utilizando habitualmente en el sector de defensa como medio para eliminar interferencias (“anti-jamming”) o para encriptación. De hecho, CDMA fue propuesto como esquema teórico, a modo de “spinn-off” del ámbito militar, a finales de la década de los 40 pero su aplicación práctica en el sector comercial tuvo lugar unos 40 años más tarde. Esta técnica se basa en esparcir el espectro de frecuencias de una señal en un ancho de banda mayor que el mínimo necesario para la transmisión a lo largo de toda la transmisión, es decir, las frecuencias que componen la señal viajan esparcidas a lo largo de todo el enlace con lo cual se consigue camuflar la señal. Al llegar al receptor la señal se recompone, es decir, las frecuencias se “juntan otra vez” para obtener la señal inicial que ha partido del emisor. De esta forma, se pueden obtener una serie de enlaces que utilizan la misma banda de frecuencia simultáneamente sin que se produzcan interferencias. La técnica de espectro disperso presenta dos modalidades: Salto de Frecuencia (FH - Frequency Hopping) o salto de frecuencia y Secuencia Directa (DS - Direct Sequence) o secuencia directa. El salto de frecuencia se puede describir en términos de que la señal se esparce transmitiendo una ráfaga corta en una frecuencia para, a continuación, saltar a otra frecuencia emitiendo otra ráfaga corta y así sucesivamente. DS se puede describir en términos de que utiliza una secuencia de códigos de alta velocidad conjuntamente con la información básica que se quiere transmitir: esta secuencia se utiliza directamente para modular la portadora de radiofrecuencia (de ahí el nombre de “Direct Sequence”). En este esquema de secuencia directa cada símbolo (grupo de bits) se multiplica por un código de esparcimiento / spreading llamado secuencia de chip de forma que la banda de frecuencias de la señal se aumenta. La razón entre el número de chips por bit, que se conoce como la relación de “spreading”, constituye un factor de gran importancia para evaluar la resistencia de la señal ante interferencias. CDMA utiliza el esquema de secuencia directa.

### Las ventajas de CDMA.

Las ventajas y los movimientos empresariales en torno a CDMA aparecen suficientemente claras como para afirmar que la tendencia global es hacia la tecnología genérica CDMA. Esta tecnología presenta las siguientes ventajas fundamentales:

- (1) Mejora del tráfico telefónico.
- (2) Mejora de la calidad de la transmisión de voz y eliminación de los efectos audibles del “fading” (atenuación) multitrayecto.

- (3) Reducción del número de lugares necesarios para soportar cualquier nivel de tráfico telefónico.
- (4) Simplificación de la selección de lugares.
- (5) Disminución de las necesidades en despliegue y costos de funcionamiento debido a que se necesitan muy pocas ubicaciones de células.
- (6) Disminución de la potencia media transmitida.
- (7) Reducción de la interferencia con otros sistemas electrónicos.

➤ **“UMTS - Universal Mobile Telecommunications System”**

El UMTS, la tercera generación de redes de comunicación móviles, es en la actualidad especificado como parte de la iniciativa tecnológica europea RACED.

El anhelo de UMTS es implantar la movilidad terminal y la personal en su sistema, proporcionando un único sistema mundial estándar. Fuera de Europa, UMTS es conocido como Telefonía Móvil Internacional para el año 2000 (IMT 2000 - International Mobile Telephone 2000), lo que reemplaza a su nombre anterior de FPLMTS.

UMTS está concebido como el proveedor de la infraestructura necesaria para proporcionar un completo abanico de servicios digitales multimedia o tele-servicios, requiriendo canales “bit-rates” o menos que el techo superior de 2 Mbps, como lo asignado en la Radio Conferencia Administrativa Mundial (WARC – World Administrative Radio Conference)'92 bandas.

UMTS debe además mantener el servicio móvil tradicional, proporcionado actualmente en redes de comunicación distintas, incluyendo celulares, paginados, circuitos locales sin cables y servicios de satélites.

Los teleservicios móviles requieren un grado más alto de bits, de 2 a 155 Mbps, y están previstos para llevar a cabo por los Sistema de Banda Móvil (MBS – Mobile Band System), un posible sucesor de UMTS, que está aún en estudio.

UMTS jugará un rol importante en la creación de los mercados futuros para las comunicaciones inalámbricas multimedia de alta calidad cuyo número de usuarios se incrementará a cerca de 2 billones en todo el mundo para el año 2010.

UMTS hará posible la entrega de servicios de información, comercio y entretenimiento de banda ancha de alto valor, a usuarios móviles vía redes fijas, inalámbricas y satelitales.

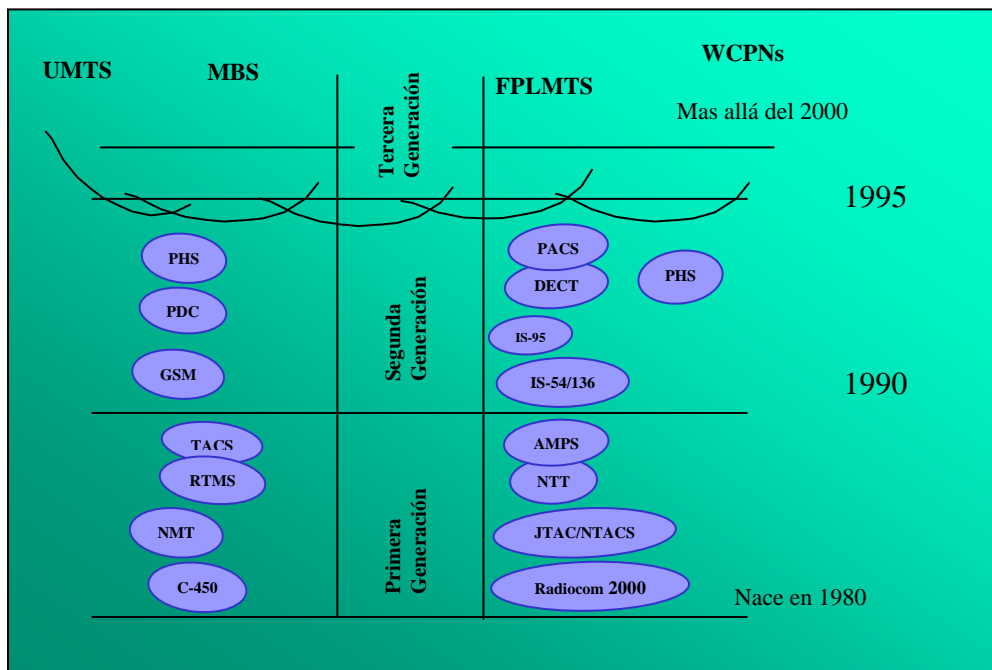
UMTS proporcionará entregar a bajo costo, una alta capacidad en las comunicaciones móviles ofreciendo tasas de transmisión que van por arriba de los 2 Mbps con “roaming” global y otras capacidades avanzadas. Será capaz de llevar fotografías, gráficos, comunicaciones en video y otros tipos de información de banda ancha así como voz y datos, dirigido a personas que pueden estar en movimiento utilizando un innovado esquema de acceso por radio y un núcleo de red mejorado.

UMTS es uno de los mejores sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación que están siendo desarrollados dentro de la estructura que ha sido definida por la ITU y que se conoce como IMT-2000.

### **GENERACIONES DE LA TELEFONÍA CELULAR**

Los Futuros Sistemas de Comunicación Personal Inalámbricos (FWPC – Communication Personal Wireless Future) definen la existencia de un objetivo fundamental de la ingeniería de la comunicación, proveerán servicios de comunicación personas a personas, en algún lugar o tiempo, sin ninguna demora al usar una unidad pocket-sized a un mínimo costo con una calidad y seguridad aceptable, a través del uso de un personal de telecomunicaciones.

Las tres generaciones del sistema FWPC están mostradas en la figura 1.11. El objetivo de la investigación y desarrollo del sistema FWPC se encuentra enfocado en tres plataformas tecnológicas: UMTS, MBS y Redes Locales de Clientes Inalámbricos (WCPN – Wireless Client Place Network). La UMTS es un sistema digital multifunción, multiservicio y multiaplicación, desarrollándose actualmente en operaciones de los sistemas de segunda generación y algunos otros van sobre los sistemas superiores a la segunda generación.



**Figura 1.11** Generaciones del sistema FWPC.

#### **Primera generación (1G)**

En 1971 se propuso el concepto de celular como un avanzado sistema de comunicación móvil. Esta intrigante idea proponía el reemplazo de las estaciones bases ubicadas en el centro de la ciudad por múltiples copias de tales estaciones de menor potencia distribuidas a lo largo del área de cobertura.

El concepto celular añade una dimensión espacial al modelo “trunking” usado anteriormente en la telefonía móvil. Estas células son ligadas a través de un centro de conmutación central y una función de control. Y es así como la vieja red se emplea a gran escala.

Los primeros sistemas que alcanzan un desarrollo comercial significativo aparecen en los años ochenta: En Europa los sistemas NMT-450 y en EUA, el Sistema Telefónico Móvil Americano (AMPS - American Mobile Phone System) adaptado en Europa como TACS empiezan ofreciendo un servicio que tiene, desde el punto de vista de usuario, las características del servicio actual:

- ◆ Posibilidad de realizar y recibir llamadas en cualquier punto del área de cobertura del sistema.
- ◆ Continuidad de la comunicación al pasar del radio de acción de una estación de base al de la estación contigua.

Sin embargo, estos sistemas solo alcanzan unas penetraciones limitadas debido a los elevados costos que implican. Solo en los países nórdicos, en los que las condiciones económicas – altas rentas percapitas - y sociales – tendencia a vivir en el campo - eran particularmente favorables, se llega a una amplia penetración.

Las razones de que los costos fueran tan elevados, las hay de dos tipos:

1. Por un lado, falta de competencia entre los operadores y suministradores de equipos que obligaran a bajar los precios. Cuando en Gran Bretaña se introdujo el segundo operador, incluso el crecimiento del sistema TACS, analógico, se aceleró considerablemente.
2. Por otro, dificultades de orden técnico. Entre estas las más destacables son:
  - ◆ Existencia de varios estándares y, por tanto, series de fabricación limitadas.
  - ◆ Sistemas de baja capacidad o eficiencia radioeléctrica que implica un gran consumo de frecuencias o bien instalaciones caras.
  - ◆ Sistemas analógicos que implican una tecnología voluminosa y de difícil mantenimiento.
  - ◆ Sistemas propietarios, es decir, dependencia de un único fabricante.

Esta primera generación de telefonía móvil hizo su aparición en 1979, y se caracterizó por ser analógica y estrictamente para voz. La calidad de los enlaces de voz era muy baja, baja velocidad [2400 bauds], la transferencia entre celdas era muy imprecisa, tenían baja capacidad [basadas en Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA - Frequency Division Multiple Access)] y la seguridad no existía. La tecnología predominante de esta generación es AMPS.

La tabla 1.3 muestra algunos sistemas de telefonía celular empleados durante la primera generación:

Sistema	País	No. de Canales	Espaciado (Khz.)
AMPS	EUA.	832	30
C-450	Alemania	573	10
ETACS	Reino Unido	1240	25
JTACS	Japón	800	12.5
NMT-900	Escandinavia	1999	12.5
NMT-450	Escandinavia	180	25
NTT	Japón	2400	6.25
Radiocom-2000	Francia	560	12.5
RTMS	Italia	200	25
TACS	Reino Unido	1000	125

**Tabla 1.3** Sistemas de telefonía celular en la primera generación.

Características de los sistemas de telefonía celular empleados en la primera generación:

#### **AMPS (Advanced Mobile Phone System)**

Desarrollado por los Laboratorios Bell AT&T. Funciona en la banda de los 800 MHz.

#### **EAMPS (Extended Advanced Mobile Phone System)**

Aumenta la capacidad del AMPS y aun hoy en día continúa siendo el sistema mas extendido en EUA y su entorno de influencia.

#### **NAMPS (Narrowband Advanced Mobile Phone System)**

Desarrollado por Motorola a partir del EAMPS, siendo un sistema a medio camino entre el analógico y el digital.

#### **C-450**

Sistema sudafricano (nada menos) ahora conocido por “Motorphone System 512”. Y aún sigue en funcionamiento, solo en Sudáfrica.

## **C-Netz**

Antiguo sistema que funcionaba en la banda de 450 MHz usado en Alemania y Austria.

## **Comvik**

Otra víctima de la estandarización con la llegada del GSM, nació en Suecia en 1981 y pasó a mejor vida en 1996.

## **NMT 450 (Nordic Mobile Telephones)**

Sistema Nórdico de Telefonía Móvil, desarrollado por Nokia y Ericsson para entornos nórdicos, funcionaba a 450 MHz: También se implantó en España, durante los '80, por la operadora MoviLine.

## **NMT 900**

El sistema NMT “Nordic Mobile Telephony” surgió en los países escandinavos en 1981, es ideal para cubrir la mayor extensión de terreno con la menor inversión. Esta versión NMT 900 permite un mayor número de canales. Heredero del anterior, empleaba la banda de 900 MHz, para permitir mayor capacidad y terminales más pequeñas.

## **NMT-F**

Versión francesa del anterior.

## **NTT (Nippon Telegraph & Telephone)**

Desarrollado por la empresa telefónica japonesa, ha sido el estándar analógico en esta zona. Apareció una versión de alta capacidad llamada HICAP.

## **RC2000 (Radiocom 2000)**

Sistema francés que entró en funcionamiento a finales de 1985.

## **TACS (Total Access Communications System)**

Se desarrolló en Inglaterra el año 1985 por parte de Motorola, operando en la banda de 900 MHz. El sistema TACS 900 adaptado, deriva del sistema analógico AMPS americano desarrollado por los laboratorios Bell y comercializado en EUA en 1984. Con este sistema se obtiene una mejor calidad del servicio, al mismo tiempo que mejora la relación señal / ruido por tener una mayor anchura de canal. Además cuenta con equipos más pequeños y baratos.

El sistema TACS 900 conocido como TMA 900, es del mismo tipo que el anterior, analógico multicanalizado en frecuencia, pero diferente por utilizar una tecnología mucho más avanzada y barata, dando mejor calidad de audio, así como una mejor conmutación al



pasar de una a otra célula, ya que la señalización se realiza fuera de banda, al contrario que NMT, que lo hace dentro de ella, resultando casi imperceptible el ruido para el usuario, sin embargo sus estaciones base cubren un intervalo menor. Emplea la banda de frecuencia de los 900 MHz y cada MHz se divide en 40 semicanales de 25 KHz, por lo que resulta extremadamente útil, por su gran disponibilidad de canales, para cubrir áreas urbanas. Dispone de 1320 canales duplex, de los que 21 se dedican exclusivamente a control (señal digital) y el resto para voz (señal analógica)

### **ITACS (International TACS)**

Versión mejorada del TACS con un sistema de control mejorado.

### **ETACS (Extended TACS)**

Sustituto del TACS.

### **JTACS (Japan TACS)**

Es una versión del TACS desarrollada especialmente para Japón.

### **IETACS (International ETACS)**

Una variación menor del ETACS, que aporta más flexibilidad.

### **NTACS (Narrowband TACS)**

TACS de banda estrecha. Triplica la capacidad del ETACS sin pérdida de calidad de la señal.

### ***Segunda generación (2G)***

La segunda generación arribó hasta 1990 y a diferencia de la primera se caracterizó por ser digital; en la tabla 1.4 se muestran algunos de estos sistemas. El sistema 2G utiliza protocolos de codificación más sofisticados y son los sistemas de telefonía celular usados en la actualidad. Las tecnologías predominantes son:

- GSM Sistema Global para Comunicaciones Móviles. “Global System for Mobile Communications”.
- IS-136 conocido también como TIA/EIA-136 o ANSI-136. Éstos dos primeros basados en TDMA.
- IS-95 basado en CDMA Código de división múltiple de acceso “Code Division Multiple Access”.
- PDC Comunicaciones Digitales Personales “Personal Digital Communications”.

Este último utilizado en Japón.

Algunos sistemas celulares de segunda generación				
	GSM (Sistema Global para Comunicaciones Móviles)	TIA/EIA-136 (Asociación Industrial de Telecomunicaciones/Unión de Industrias electrónicas)	IS-95 (Estándar Interino 95)	PDC (Comunicaciones Digitales Personal / pacífico)
Rangos de Frecuencia, MHZ				
<b>Banda</b>	GSM-900	Celular		-
Subida	935-960		869-894	940-956
Bajada	890-915		824-849	810-826
<b>Banda</b>	GSM-1800			
Subida	1805-1880			
Bajada	1710-1785			
<b>Banda</b>	GSM-1900	PCS		-
Subida	1930-1990		1930-1990	1429-1453
Bajada	1850-1910		1850-1910	1477-1501
Canales de espaciamento, Khz.	200	1250		25
Numero de canales mínimos	125	832	20	1600
Usuarios por canal	8	3	<63	3
Técnicas de acceso múltiple	FDMA/TDMA		FDMA/CDMA	FDMA/TDMA
Modo doble	FDD			
Modulación	GMSK	$\pi/4$ -DQPSK	DQPSK(Subida) QPSK(Bajada)	$\pi/4$ -DQPSK
CDMA, FDMA, TDMA-Code/Frequency/Time División Múltiple Acces. DGPSK, GPSK-Differential Quadrature Phase Shift Keying. FDD-Frequency División Dupleding. GMSK-Gaussian Minimun Shift Keying. PCS-Personal Communication System				

**Tabla 1.4** Sistemas celulares de segunda generación

Los protocolos empleados en los sistemas 2G soportan velocidades de información más altas para voz pero limitados en comunicaciones de datos. Se pueden ofrecer servicios auxiliares tales como datos, fax y SMS. La mayoría de los protocolos de segunda generación ofrecen diferentes niveles de encriptación. En los Estados Unidos y otros países se les conoce a éstos como PCS.

La principal ventaja de los teléfonos de segunda generación sobre sus precesores analógicos son su gran capacidad y menor necesidad de carga de batería. En otras palabras, ellos satisfacen a los usuarios asignando una frecuencia consumiendo menos potencia.

## ***Generación 2.5 G***

La generación 2.5G ofrece características extendidas para ofrecer capacidades adicionales que los sistemas de segunda generación tales como GPRS, HSCSD, Evolución Global para la Medida de datos Mejorados (EDGE - Enhanced Data Rates for Global Evolution), IS-136B, IS-95B, entre otros. La tecnología 2.5G es más rápida y más económica para actualizarse a los sistemas de tercera generación.

Muchos de los proveedores de servicios de telecomunicaciones (“carriers”) se movieron a las redes 2.5G antes de entrar masivamente a 3G. Los “carriers” europeos y de Estados Unidos se movieron a 2.5G en el 2001. Mientras que Japón fue directo de 2G a 3G también en el 2001.

## ***Tercera generación 3G.***

El propósito de la Tercera generación consiste en superar las limitaciones técnicas de las tecnologías precedentes. La tercera generación es tipificada por la convergencia de la voz y datos con acceso inalámbrico a Internet, aplicaciones multimedia y altas transmisiones de datos.

Los protocolos empleados en los sistemas 3G soportan altas velocidades de información enfocados para aplicaciones mas allá de la voz tales como audio (MP3), video en movimiento, video conferencia y acceso rápido a Internet, sólo por nombrar algunos.

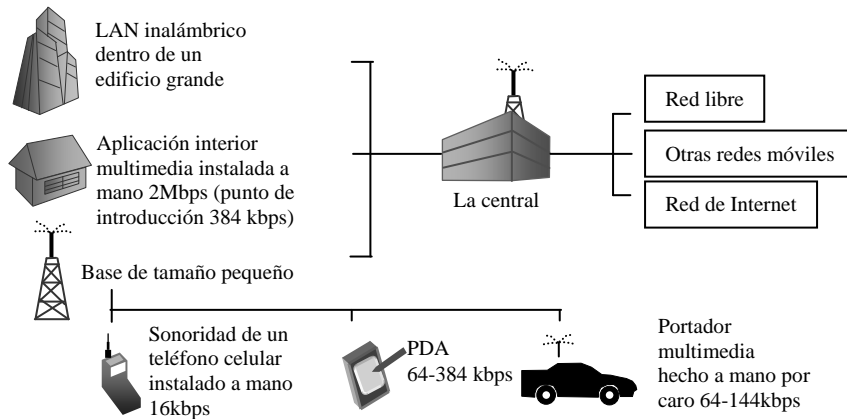
Entre las tecnologías contendientes de la tercera generación se encuentran UMTS, CDMA2000, IMT-2000, ARIB (3GPP), UWC-136, entre otras.

El impulso de los estándares de la 3G está siendo apoyado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones ITU y a este esfuerzo se le conoce como IMT-2000, en la figura 1.12 se muestra un esquema de lo que fueron las Telecomunicaciones Móviles Internacionales del año 2000.

Los principales requerimientos para esta tecnología incluyen:

- Calidad de voz comparable a la que ofrece una red telefónica pública (PSTN).
- Velocidad de transmisión de datos de 144kb/s para usuarios en vehículos en movimiento viajando a una velocidad de 120Km/h en ambientes exteriores.
- Velocidad de transmisión de datos de 384kb/s para peatones, que se encuentren en un solo lugar o bien moviéndose sobre áreas pequeñas.
- Soporte para operaciones de 2.048 Mb/s en oficinas, es decir en ambientes estacionarios de corto alcance o en interiores.
- Soporte para ambos servicios de datos de conmutación por paquetes y conmutación por circuitos.
- Una interfaz adaptada para las comunicaciones móviles de Internet, que permita un ancho de banda más grande para enviar información que para recibir.
- Mayor eficiencia del espectro disponible.
- Soporte para una gran variedad de equipo móvil.

- Introducción flexible a los nuevos servicios y tecnologías.



**Figura 1.12** Telecomunicaciones Móviles Internacionales para el año 2000.

Lo ideal es que los sistemas de tercera generación provean servicios en cualquier lugar y a cualquier hora. Mientras que los servicios analógicos y los primeros servicios digitales fueron diseñados solo para resolver problemas de sistemas analógicos, como seguridad, bloqueo e incompatibilidad regional; iniciándose así, una nueva visión a la migración a 3G y por lo tanto hacia nuevos servicios.

Actualmente solo diez de las tecnologías de Transmisión de Radio Terrestre (RTT - Radio Terrestrial Transmission) tienen los mínimos requerimientos de capacidad de IMT-2000 presentado por la ITU en junio de 1998. Éstas se muestran a continuación en la tabla 1.4.

Una de las propuestas más prometedoras para la creación de la nueva generación es la combinación de la interfaz aérea del ancho de banda de CDMA (W-CDMA) con la red GSM.

Entre las diversas organizaciones que procuran combinar sus ofertas de W-CDMA están la Asociación de Japón de las Industrias y de los Negocios de Radio (ARIB – Association Radio Industry and Business), la Alianza para las Soluciones de la Industria de las Telecomunicaciones (ATIS – Alliance Telecommunications Industry Solutions), T1P1, Los Servicios inalámbricos Integrados de la Red Digital de Multimedia (WIMS – Wireless Integrated Multimean Services), y el Instituto Europeo de Estandarización de Telecomunicaciones (ETSI - European Telecommunications Standardization Institute) a través de su GMS. El esquema que tienen en mente se aprovecha de las técnicas de radio de W-CDMA sin hacer caso de los numerosos sistemas desplegados por GSM.

Estas organizaciones se basan en el UMTS de ETSI's. Llamado UTRA (para el acceso de radio terrestre de UMTS), la propuesta describe dos modos de funcionamiento: el multiplexaje de la frecuencia y de división de tiempo.

Diez tecnologías de transmisión de radio terrestre (RTT)				
Tecnología	Acrónimo	Soporte	Acrónimo	Nacionalidad
CDMA 2000 (Acceso Múltiple por División de Código)	-	Espacio de ancho de banda TIA-Espectro digital Tecnología de Comisión(TR 45.5)	-	Estados Unidos
Telecomunicaciones digitales sin unión mejoradas	DECT	Instituto Estándar de Telecomunicaciones Europeas	ETS 1	Europa
Secuencia CDMA directa síncrona de multibanda global	CDMA I		-	Corea
Secuencia CDMA directa asíncrona global	CDMA II		-	Corea
CDMA síncrona tiempo-división	TD-SCDMA	Academia China de tecnología en telecomunicaciones	CATT	China
UMTS(Sistema de Telecomunicación Móvil Universal) Acceso radio terrestre	UTRA	Grupo Móvil Especial ETSI	ETSISMG	Europa
Comunicaciones Inalámbricas Universales 136	UWC-136	Comité Celular Digital (TR 45.3)	-	Estados Unidos
Ancho de banda CDMA/NA	W-CDMA/NA	Alianza para la solución de las industrias de telecomunicaciones – Comité T1P1	ATIS	Estados Unidos
Ancho de banda CDMA	W-CDMA	Asociación de industrias de radio y negocios	ARIB	Japón
Integrados inalámbricos – servicios digitales - Servicios de red multimedia W-CDMA	WINS W-CDMA	Móvil TIA&Comité de comunicaciones personales 1800 (TR46)	-	Estados Unidos
TIA – Asociación de Industrias de Telecomunicaciones UMTS – Sistema de Telecomunicación Móvil Universal				

**Tabla 1.4** Tecnologías de transmisión de radio terrestre.

***Propuesta CDMA2000 para revestir IS-95.***

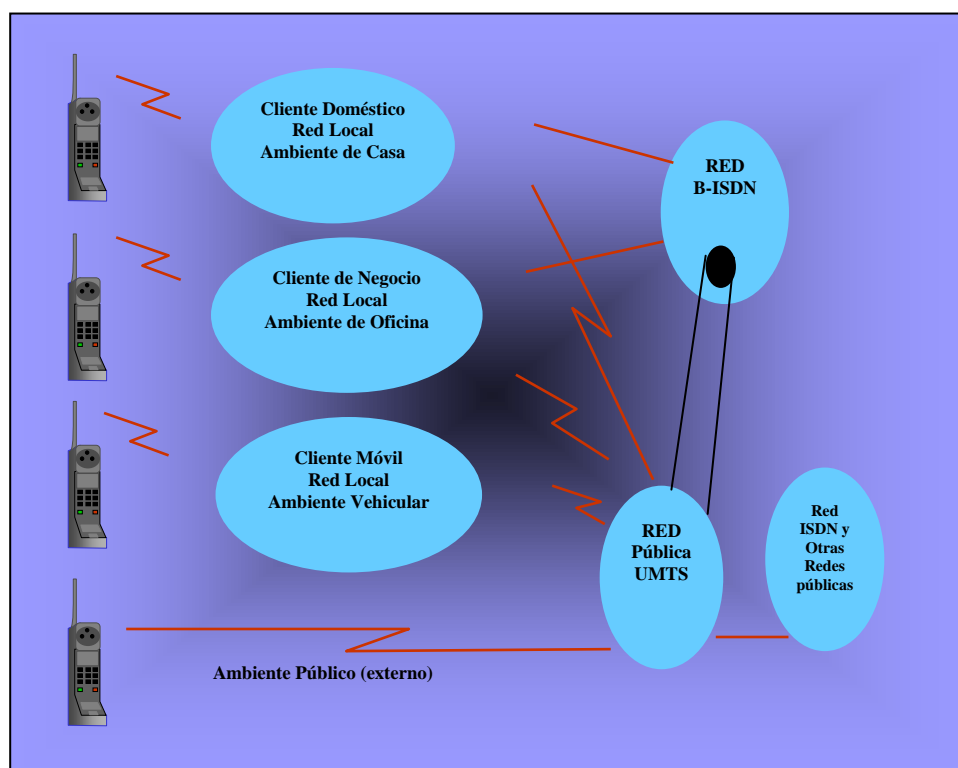
El subcomité TR-45.5 de la Asociación de la Industria de Telecomunicaciones (TIA – Telecommunications Industry Association) sometió una tecnología de radio de transmisión llamada CDMA2000. Esta RTT protege inversiones en el equipo y los sistemas IS-95, de los cuales existen varios en Norteamérica y Corea.

La tecnología propuesta explota al máximo la capacidad del sistema de segunda generación actual de CDMA para validar algunas características de la tercera generación. De hecho, los sistemas actuales, conocidos como CDMAOne, se pueden ver como versiones de banda estrecha de sistemas completamente desarrollados para la tercera generación CDMA2000.

La tecnología TR45.5 utiliza “handoffs” entre los sistemas de segunda generación (CDMAOne) y de tercera generación (CDMA2000) así como ambas técnicas de radio de división en dos canales de frecuencia y de tiempo. Un sistema de CDMAOne puede desplegar algunas características de la nueva generación sin ampliar el ancho de banda del canal, a condición de que ciertos detalles de señalización y de recursos lógicos dentro del canal de 1.25 MHz se modifiquen para resolver las necesidades del paquete de la radio y de servicios asimétricos. Más características de banda ancha pueden ser agregadas más adelante multicanalizando los canales adicionales de CDMAOne en incrementos de 1,25 MHz.

### ***UMTS (Universal Mobile Telephone Service)***

UMTS es un sistema móvil de tercera generación que está siendo desarrollado por el organismo ETSI junto el IMT-2000 de la ITU. UMTS es sistema europeo que está intentando combinar la telefonía celular, teléfonos inalámbricos, redes locales de datos, radios móviles privados y sistemas de radiolocalización “paging”. Que va a proveer velocidades de hasta 2 Mbps, haciendo los videoteléfonos una realidad. Las licencias de UMTS están atrayendo gran interés entre los “carriers” del continente europeo debido a que representa una oportunidad única para crear un mercado en masa para el acceso a la información, altamente personalizado y amigable para la sociedad. UMTS busca cimentar y extender el potencial de las tecnologías móviles, inalámbricas y satelitales de hoy en día. La figura 1.13 muestra las posibles configuraciones para el UMTS subred y redes fijas.



**Figura 1.13** Posibles configuraciones de los servicios UMTS.

### ***Proyección de la 3G.***

Lo que sigue en este momento es esperar a que los “carriers” ofrezcan los servicios de 3G. Por ejemplo, en Japón ya están operando con las tecnologías de 3G. El servicio con más éxito es “i-mode” de NTT DoCoMo que utiliza una red basada en paquetes conocida como PDC-P, aunque es una tecnología propietaria que tiene actualmente más de 17 millones de suscriptores. NTT DoCoMo también piensa incursionar con W-CDMA y sus contendientes en ese país para servicios 3G son DDI y J-Phone. En Estados Unidos, compañías como Qualcomm y Sprint PCS ya empezaron a realizar pruebas del servicio 3G.

La batalla por las licencias de 3G de UMTS es otro asunto de gran importancia y varias son las compañías las involucradas en obtener las valiosas licencias de telefonía móvil de tercera generación, tales como: Telecom Italia (Italia); Vodafone, Orange y BT Cellnet (Inglaterra); T-Mobil (Alemania), France Telecom (Francia); KPN Telecom (Holanda), NTTDoCoMo (Japón), etc. Las compañías que dominan mercados pequeños deberán aliarse con los grupos grandes.

A parte de las cantidades enormes de dinero que cuestan las licencias, hay que tomar en cuenta que las redes telefónicas de estos “carriers” son redes grandes y complejas, por lo que les tomará tiempo y grandes inversiones de capital para implantar la tecnología. Pero muchas de las ventajas de esas redes son que varias de ellas ya están ofreciendo servicios de datos, y prevalecerán aquellas empresas de telecomunicaciones que tengan la mayor experiencia en tecnologías inalámbricas y tomen ventaja de ello para las nuevas redes del futuro.

Con relación a predicciones en cuanto a usuarios móviles, “The Yankee Group” anticipa que en el 2004 habrá más de 1150 Millones de usuarios móviles en el mundo, comparados con los 700 millones que hubo en el 2000. Por otra parte Ericsson predice que habrá 1000 millones de usuarios en el 2002. Dichas cifras nos anticipan un gran número de capital involucrado en la telefonía inalámbrica, lo que con más razón las compañías fabricantes de tecnología, así como los proveedores de servicios de telecomunicaciones estarán dispuestos a invertir su capital en esta nueva aventura llamada 3G.

Independientemente de cual tecnología en telefonía inalámbrica predomine, lo único que le interesa al usuario final es la calidad de voz, que no se bloqueen las llamadas y que en realidad se ofrezcan las velocidades prometidas.

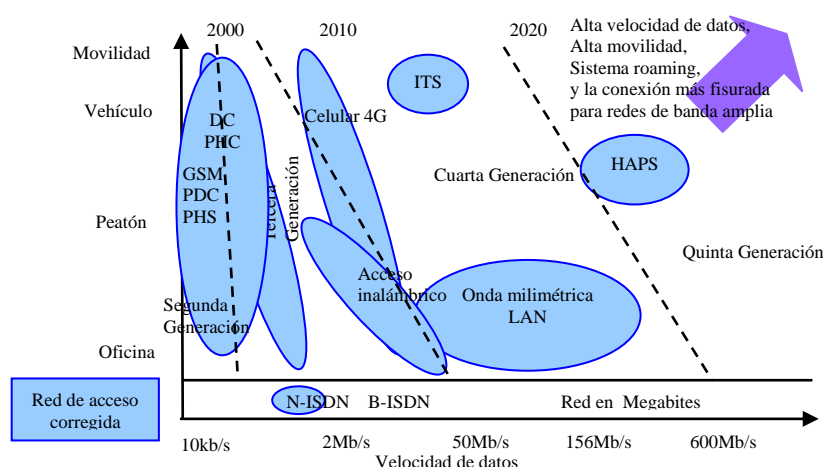
### ***PERSPECTIVAS (4G Y 5G)***

El auge de los sistemas digitales, especialmente en lo referente a las redes de datos (Internet) en los 90’s, ha influido grandemente en los sistemas de comunicación móviles. Esto lo podemos observar en la última etapa de la segunda generación, llamada en algunas ocasiones 2.5G, la cuál a través de protocolos como WAP, ofrece servicio de navegación por Internet (de manera muy limitada: sólo texto y sin formato) y de envío de mensajes (SMS), a la vez que estándares como GSM fueron diseñados para proveer servicios digitales a través de anchos de banda reducidos (9 K/bits).

Pese a ello, la demanda de comunicaciones en formato digital (multimedia, videoconferencia, email, etc.) y el crecimiento de los servicios de valor agregado (“roaming” a cualquier parte, llamada en espera, agenda electrónica, etc.), superan en mucho la oferta que existe actualmente en el mercado y en no pocas ocasiones a la tecnología disponible.

En la tercera generación deberán de converger las redes digitales y los sistemas de comunicación móvil, creando a su vez una sociedad dependiente de los formatos digitales, de ahí que el nuevo paradigma de la telefonía celular se base en proveer comunicaciones multimedia, acceso a redes inalámbricas, y “roaming” automático en los distintos sistemas.

Toda esta demanda requiere a su vez un desarrollo tecnológico impresionante, incluyendo el empleo de sistemas de altas frecuencias para proporcionar los anchos de banda requeridos, esto se observa en la figura 1.14:



**Figura 1.14** Esquema del desarrollo tecnológico.

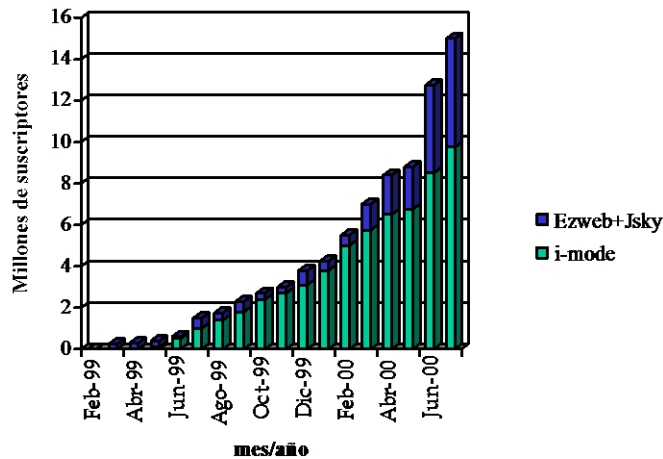
### Limitaciones de la tercera generación.

Resulta paradójico, que pese a que la tercera generación no ha entrado en vigor como se preveía al inicio del presente siglo, ya se tengan establecidas sus limitaciones, además de fijar su tiempo de vida a sólo diez años, estos supuestos se basan en el acelerado crecimiento de las redes de datos y en las tendencias del mercado.

Como ejemplo podemos citar a Japón, donde se prevé que el número de subscriptores alcance los 81 millones en el año 2010, y que para el 2006 se tenga ya saturado el mercado. No obstante que el número de subscriptores no se incremente más haya de estas cifras, el número de usuarios de Internet móvil seguirá creciendo. Esta tendencia ya se observa en el mercado actualmente, como muestra en la figura 1.15 se tiene nuevamente lo ocurrido en Japón en los últimos años:



### Incremento del número de suscriptores



**Tabla 1.15** Incremento del número de suscriptores en Japón.

En Japón un nuevo servicio de Internet móvil, llamado “i-mode” fue estandarizado a finales de 1999, además otros operadores ofrecieron un servicio similar, llamado “Ezweb and J-sky”. Los usuarios de estos servicios pueden acceder a páginas web, servicios bancarios, y enviar correo electrónico desde sus teléfonos celulares. Como se observa en la gráfica a poco más de un año de haber entrado en servicio, el número de usuarios superaba los 15 millones, además si consideramos el rápido crecimiento de aplicaciones multimedia, y los nuevos lenguajes (Java, PHP, ASP) que han revolucionado los portales web, podemos prever que este crecimiento se acelerará aún más, y para el 2010 se tenga una relación de tráfico multimedia respecto a voz de 10: 1, 23 veces el estado actual.

Todo este crecimiento supera por mucho las expectativas planteadas en la tercera generación, que si bien es verdad que soportará tráfico multimedia, a través de técnicas como W-CDMA que será capaz de proporcionar anchos de banda de 384 Kbits/s en móviles y 2 Mbit/s, estos resultan ridículos si los comparamos con las redes de datos que superan los Gbits actualmente. Además la tercera generación es incapaz de proveer la calidad de servicio necesario en las comunicaciones multimedia, como es la videoconferencia.

Por lo que ha sido necesario establecer una nueva generación (por lo menos), basada en técnicas totalmente diferentes para poder afrontar los nuevos retos de las comunicaciones móviles.

#### Características de la cuarta generación (4G).

La cuarta generación deberá superar por mucho a sus predecesoras y aunque aún no se tiene muy claro como será esto posible, ya se tienen establecidos la mayoría de los requisitos que deberá esta cumplir:

- ◆ *Alta tasa de transmisión:* La tasa de transmisión de las futuras generaciones deberá alcanzar rangos de 2-600 Mbits/s dependiendo del sistema.
- ◆ *Gran movilidad.* Esta característica es de las más difíciles de llevar a cabo, especialmente en las tasas de transmisión que se requieren. No obstante será la base para los Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS – Intelligent Transportation System), que operarán en su primera etapa en la banda de frecuencia de los 5.8 Gigahertz.
- ◆ *Gran cobertura y simplicidad del “roaming” entre sistemas.* Al tener altas tasas de transmisión el tamaño de las células se decrementa, para poder afrontar este problema se plantea el uso de sistemas de estaciones Estación de Plataforma de Altitud Alta (HAPS - High Altitude Platform station) colocadas en aeronaves a 20 km del suelo que retransmitan la señal. Además se contará con una gran variedad de sistemas, como son redes LAN inalámbricas, ITS's, entre otros, que serán imprescindibles en el futuro, los cuales deberán convivir con las comunicaciones móviles. El primer paso para llevar a cabo esta compatibilidad, llamada “roaming” entre sistemas, es el soporte de redes IP.
- ◆ *Alta capacidad y bajos costos.* La capacidad por unidad área de la 4G deberá ser 10 veces mayor que la de su predecesora, además los costos deberán ser mucho más bajos para que estén al alcance de todos.
- ◆ *Calidad de servicio y control sobre esta.* Al usar los sistemas inalámbricos recursos limitados (ancho de banda, potencia), se requiere que los organismos estandarizadores controlen adecuadamente el mercado para evitar abusos.

### Sistemas de la 4G.

Debido a la gran variedad de servicios que plantea la siguiente generación de comunicaciones móviles, hace necesario la existencia de varios tipos de sistemas enfocados a proporcionar un servicio en específico, de esta manera tenemos.

- ◆ ***MMAC (Sistema de Acceso a las Comunicaciones Móviles Multimedia):*** Este sistema está enfocado a proveer acceso a las redes inalámbricas de alta velocidad. El MMAC provee dos categorías de acceso a las redes inalámbricas. La primera de ellas que ha operado en interiores y exteriores proporcionando tasas de transmisión superiores a los 30 Mbits/s en una frecuencia de 5.2 GigaHertz y empezó a funcionar desde el 2001. La segunda proveerá tasas aún más altas en interiores (600 Mbits/s), en ondas milimétricas (60 GHz). Estos sistemas están limitados a una pequeña área de cobertura, y no son capaces de proveer ningún servicio dentro de las comunicaciones móviles, su principal uso es el de crear la red dorsal donde se conectarán el resto de los sistemas.
- ◆ ***ITS (Sistemas de Transporte Inteligentes):*** Por medio de los ITS's se espera resolver los problemas de accidentes y congestión en las grandes ciudades. Los ITS's son considerados como el negocio más prometedor dentro de las telecomunicaciones en los próximos años, se estima un

mercado potencial de superior a los 53 trillones de yenes. Los sistemas de telecomunicaciones relacionados con ITS's se dividen en sistemas de comunicación vehículo base y comunicación entre vehículos.

- ◆ **HAPS (Sistemas de Estaciones en Plataformas de Alta Altitud):** Este tipo de sistema es muy atractivo para las comunicaciones multimedia, ya que puede soportar gran variedad de servicios, acceso altas tasas de transmisión, además de aumentar el área de cobertura.

### Retos tecnológicos de la 4G

Para poder llevar a cabo la implantación de los sistemas planteados en la próxima generación es necesario un desarrollo tecnológico impresionante en varias áreas de las telecomunicaciones.

- ◆ **Modulación y transmisión de las señales:** Los sistemas móviles que trabajan a altas frecuencias sufren mucho de interferencia, por lo que son necesarios esquemas de modulación y demodulación que resuelvan estos problemas. Esquemas de modulación multiportadora, incluyendo el Multiplexaje Ortogonal por División de Frecuencia (OFDM - Orthogonal Frequency-Division Multiplex) son los candidatos. Otro problema que se tiene en estos sistemas es bajo valor de la razón señal a ruido requerido. Para ello es necesario implantar códigos de detección y corrección de errores.
- ◆ **Propagación.** La propagación de las señales se llevará a cabo a través de sistemas de microondas y ondas milimétricas, los cuales tienen grandes problemas ocasionados por el medio ambiente.
- ◆ **Desarrollo de Software:** Para poder llevar a cabo la integración de los diversos sistemas es necesario el desarrollo de estándares dentro de la industria del software, además si consideramos la gran importancia que tiene el procesamiento digital de las señales para adecuarlas al medio de transmisión y para poder recibirlas adecuadamente, es claro que disponer de mejores algoritmos y aplicaciones será básico dentro del nuevo mercado.
- ◆ **Antenas inteligentes:** Las nuevas antenas deberán ser capaces de suprimir las señales no deseadas, auto ajustar la ganancia, e incorporar algoritmos de procesamiento de señales. Y todo esto dentro de tamaños de unos centímetros.
- ◆ **Transmisiones sobre fibra:** Este tipo de transmisión es muy importante dentro de los ITS's
- ◆ **Arquitectura de las redes y protocolos:** El principal reto de las redes de datos es el establecer interacción con los sistemas de comunicación inalámbricos a través de pila de protocolos como IP, conmutación por paquetes, calidad de servicios y escalabilidad.
- ◆ **Dispositivos:** Se requiere el desarrollo de elementos que trabajen en altas frecuencias, que representan un reto para la electrónica actual.

Todos estos requerimientos que plantea la siguiente generación de comunicaciones móviles podría en un momento dado retrasar su lanzamiento en el mercado, o su implementación

parcial, dejando para una nueva (la quinta quizás, 5G) el reto de satisfacer a un mercado cada vez más exigente y con necesidades creadas por modas pasajeras (“Internet”).

## ***NORMATIVIDAD EN MÉXICO***

### **Norma Oficial Mexicana (NOM-081-SCT1-1993)**

Para garantizar la compatibilidad, es esencial que se especifiquen tanto los parámetros de los sistemas de radio así como el procedimiento para el proceso de las llamadas. De ahí que resulte imprescindible llevar a cabo una normativa respecto a estos temas antes de que sean implantados en el Mercado. A continuación se mencionan las principales normas establecidas en México con este fin.

El servicio de Telefonía Celular en México se presta a través de dos tipos de asignación de bandas de frecuencia: la banda de frecuencia A y la banda de frecuencia B.

La concesionaria Radio Móvil Dipsa S. A. de CV. (Telcel), presta el servicio a través de la banda B, misma que cuenta con cobertura nacional.

En 1991 se forma la asociación Mexicana de concesionarios de radiotelefonía celular. , AC., integrada por las compañías restantes que operan en México, las cuales prestan el servicio de radiotelefonía celular por la banda A, estas empresas cuentan con convenios entre sí y pueden prestar el servicio con cobertura nacional (roaming).

Así mismo existe una división regional para la prestación del servicio en México que cuenta con 9 regiones con coberturas y empresas que ofrecen servicios.

#### *Designación y espaciamiento de canales.*

El espaciamiento de canales debe ser 30 kHz. y el canal de transmisión de la estación móvil 825.030 MHz (y el correspondiente canal de transmisión de la estación base en 870.030 MHz.) debe ser definido como el canal número 1.

#### *Clases de estaciones móviles.*

Clase I Estación de alta potencia.

Clase II Estación de potencia media.

Clase III Estación de baja potencia.

#### *Tolerancia de frecuencia.*

La frecuencia portadora de la estación móvil debe ser mantenida dentro de  $\pm 2.5$  partes por millón (ppm) de cualquier frecuencia de canal asignada, excepto durante la conmutación de canales. Esta tolerancia debe ser mantenida sobre un rango de temperatura ambiente de -30 grados Celsius a +60 grados Celsius, y un rango de voltaje de la fuente de poder de  $\pm 15$  por ciento del valor nominal acumulativo.

La máxima potencia efectiva radiada con respecto a un dipolo de media onda (ERP) para cualquier clase de estación transmisora móvil es de 8 dBW (6.3 Watts). La Potencia Radiada nominal para cada clase de estación transmisora móvil es:

Clase I     6 dBW (4.0 Watts)

Clase II    2 dBW (1.6 Watts)

Clase III   - 2 dBW (0.6 Watts)

#### Codificación.

Los Canales de Control de Reversa (RECC - Reverse Control Channel) y el Canal de Voz de Reversa (RVC - Reverse Voice Channel) deben ser codificadas para que cada uno binario sin retorno a cero sea transformado en una transición cero-a-uno, y cada cero binario sin retorno a cero es transformado a una transición uno-a-cero.

#### Número de serie.

El número de serie es un número binario de 32 bits que identifica únicamente a una estación móvil para cualquier sistema celular. Debe ser puesto en fábrica y no alterable en el campo. El circuito que provea el número de serie debe ser aislado y sellado de contacto fraudulento. Cualquier intento de alterar el circuito de número de serie debe dejar a la estación móvil inoperante.

La distribución de bits del número de serie (SN) debe ser como sigue:

El Código de Fabricante (MFR) ocupa los 8 dígitos más significativos (bits 31 a 24) del número de serie de 32 bits. Los bits 23 a 18 deben ser reservados (inicialmente todos en cero), y los bits 17 a 0 deben ser únicamente asignados por cada fabricante.

#### Resultados del Programa de Evaluación de Calidad en redes de Telefonía Móvil.

El 7 de mayo de 2001, la Comisión Federal de Telecomunicaciones inició el programa de evaluación de calidad a las redes de telefonía móvil en 19 ciudades del país, mediante el cual se efectúa un monitoreo de los servicios que prestan las concesionarias de telefonía móvil (Bajacel, Cedetel, Iusacell, Movitel, Norcel, Pegaso, Portatel, Telcel y Unefon), con el objeto de promover una mejoría general en la provisión de los mismos, así como fomentar la competencia entre los distintos operadores.

Las mediciones consisten en determinar los porcentajes de intentos de llamadas no completadas y de llamadas caídas, así como el tiempo de establecimiento de las mismas, para cada una de las redes. Para ello, se efectúan 1,825 llamadas por concesionaria desde vehículos en movimiento, los cuales se desplazan en rutas predeterminadas que incluyen tanto avenidas principales, como vías de acceso secundarias de cada localidad.

Los resultados comparativos de los ejercicios de medición efectuados hasta el año 2001, de acuerdo con las fechas de evaluación especificadas en el "Calendario de Evaluaciones de Calidad en Redes Móviles para el año 2001", se muestran en la tabla 1.5:

Ciudad	Cobertura de Prueba (km <sup>2</sup> ) (1)	Operador Móvil	Fecha de Evaluación	Cobertura Garantizada (km <sup>2</sup> ) (2)	%Llamadas Caídas (Estándar Cofetel 6%) (3)	%Intentos de Llamadas No Completadas (Estándar Cofetel 5%) (4)
Hermosillo	95	Movitel	Del 7 al 11 de Mayo	95	1.1	2.5
		Telcel		95	0.4	2
Toluca	188	Iusacel	Del 7 al 11 de Mayo	180	0.3	2.3
		Pegaso		178	2.2	11.9
		Telcel		184	1.2	2.8
		Unefon		177	0.3	2
Chihuahua	130	Norcel	Del 21 al 25 de Mayo	130	1.5	2.8
		Telcel		120	0.2	0.9
Guadalajara	450	Iusacel	Del 21 al 25 de Mayo	395	0.6	2.9
		Pegaso		440	0.9	9.9
		Telcel		450	1.1	4.9
		Unefon		384	0.6	2.5
León	150	Iusacel	Del 4 al 18 de Junio	90	0.3	2.3
		Telcel		146	0.4	1.5
		Unefon		118	0.1	4.3
Ensenada	60	Bajacel	Del 4 al 18 de Junio	60	1.1	2.5
		Pegaso		60	1.9	5.9
		Telcel		60	0.3	0.8

**Tabla 1.5** Resultados comparativos de los ejercicios de medición del año 2001.

<b>Continuación:</b>						
<b>Ciudad</b>	<b>Cobertura de Prueba (km<sup>2</sup>) (1)</b>	<b>Operador Móvil</b>	<b>Fecha de Evaluación</b>	<b>Cobertura Garantizada (km<sup>2</sup>) (2)</b>	<b>%Llamadas Caídas (Estándar Cofetel 6%) (3)</b>	<b>%Intentos de Llamadas No Completadas (Estándar Cofetel 5%) (4)</b>
Puebla	395	Iusacell	Del 18 al 22 de junio	180	0.3	1.9
		Telcel		255	2.2	5.1
		Unefon		253	0.2	2.7
Nuevo Laredo	112	Cedetel	Del 18 al 22 de junio	112	0.7	2.7
		Pegaso		112	0.2	2.5
		Telcel		91	0.6	2.8
México	930	Iusacell	Del 2 al 6 de julio	535	0.5	2.2
		Pegaso		770	1.2	6.0
		Telcel		863	1.7	5.1
		Unefon		719	1.2	3.5
Mérida	184	Portatel	Del 2 al 6 de julio	165	3.2	14.9
		Telcel		175	0.4	1.6
Culiacán	114	Movitel	Del 16 al 20 de julio	114	1.3	2.9
		Telcel		111	0.2	1.5
Morelia	100	Iusacell	Del 16 al 20 de julio	62	0.4	2.1
		Telcel		83	0.4	2.0
		Unefon		67	0.2	1.4
Ciudad Juárez	292	Norcel	Del 30 de julio al 3 de agosto	229	0.8	2.6
		Telcel		234	0.6	1.4
Acapulco	135	Iusacell	Del 30 de julio al 3 de agosto	38	0.2	0.4
		Telcel		77	0.3	1.4
		Unefon		102	0.3	2.0

**Tabla 1.5** Resultados comparativos de los ejercicios de medición del año 2001.

<b>Continuación:</b>						
<b>Ciudad</b>	<b>Cobertura de Prueba (km<sup>2</sup>) (1)</b>	<b>Operador Móvil</b>	<b>Fecha de Evaluación</b>	<b>Cobertura Garantizada (km<sup>2</sup>) (2)</b>	<b>%Llamadas Caídas (Estándar Cofetel 6%) (3)</b>	<b>%Intentos de Llamadas No Completadas (Estándar Cofetel 5%) (4)</b>
Tijuana	230	Bajacel	Del 6 al 10 de agosto	230	0.9	1.5
		Pegaso		199	0.5	0.6
		Telcel		216	0.2	1.5
Querétaro	100	Iusacell	Del 6 al 10 de agosto	56	0.3	1.9
		Telcel		76	0.3	0.9
		Unefon		76	0.2	0.5

**Tabla 1.5** Resultados comparativos de los ejercicios de medición del año 2001.

- (1) **Cobertura de Prueba (km<sup>2</sup>).** Área geográfica máxima de evaluación establecida por la Cofetel.
- (2) **Cobertura Garantizada(km<sup>2</sup>).** Área de cobertura de servicio garantizada por el operador móvil evaluado dentro de la Cobertura de Prueba. Cabe destacar que ciertos operadores ofrecen servicios más allá de la Cobertura de Prueba.
- (3) **% Llamadas Caídas.** Porcentaje de llamadas que una vez establecidas tuvieron la imposibilidad de continuar con la comunicación.
- (4) **% Intentos de Llamadas No Completadas.** Porcentaje de intentos de llamadas en los cuales, habiéndose realizado adecuadamente el proceso de marcación respectivo, no se logra establecer la comunicación con el destino final en un tiempo menor a 12 segundos.



## CAPÍTULO 2

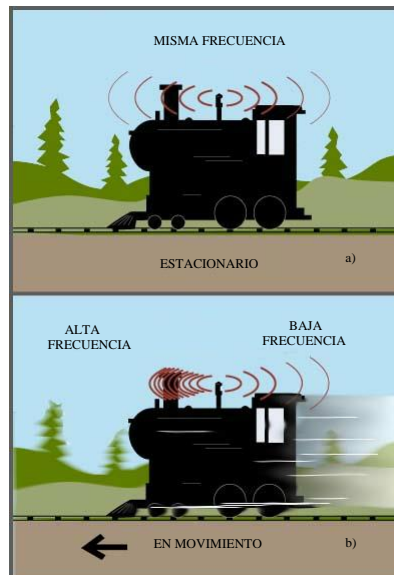
### EL CORRIMIENTO DOPPLER

Christian Doppler fue un físico Austriaco del siglo pasado (el XIX) famoso por su estudio de como cambian las propiedades del sonido cuando el objeto que lo emite está en movimiento. Doppler encontró las expresiones matemáticas que describen como un objeto se acerca hacia nosotros y el sonido que emite se vuelve más agudo mientras que al alejarse de nosotros el sonido es mas grave. Aun cuando el trabajo de Doppler se refirió al estudio de las ondas de sonido, este mismo fenómeno se produce en otros tipos de ondas, particularmente en las ondas electromagnéticas, como la luz: cuando una fuente de luz se acerca hacia nosotros se ve más azul, mientras que si se aleja se ve más roja.

#### *Descripción del corrimiento Doppler*

El corrimiento Doppler se refiere al cambio aparente en la frecuencia de las ondas emitidas por una fuente cuando existe un movimiento relativo entre la fuente y el oyente.

Cuando un observador que escucha se mueve acercándose o alejándose de una fuente sonora que puede estar en reposo o en movimiento, la frecuencia del sonido que se percibe es diferente que cuando se encuentran en reposo. Por ejemplo, la frecuencia del sonido que emite una locomotora cuando se acerca al observador, es mayor que cuando se aleja (ver figura 2.1).



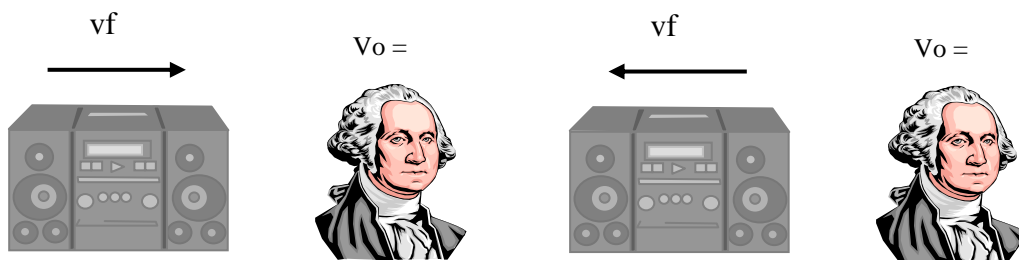
**Figura 2.1:** a) locomotora en reposo, b) locomotora en movimiento.

A continuación se estudiará la relación que existe entre la frecuencia emitida por una fuente y la percibirá por el receptor, cuando uno se mueve con respecto al otro sobre la línea recta que los une. Para ello se analizarán varias situaciones:

1. Cuando la fuente está en movimiento y el observador en reposo.
2. Cuando el observador está en movimiento y la fuente no.
3. Cuando tanto la fuente como el observador están en movimiento.

**Caso 1. Cuando la fuente esta en movimiento y el observador en reposo.**

En la figura 2.2 se observan dos figuras representativas las cuales muestran la manera en la cual se puede presentar el primer caso: fuente en movimiento y observador en reposo, ya que como se observa la fuente puede estar acercándose o alejándose del observador.



**Figura 2.2** Fuente en movimiento y observador en reposo.

Para este análisis se llamará:

- fo: La frecuencia percibida por el observador.
- f: La frecuencia propia de la fuente.
- Vo: La velocidad del observador respecto al medio.
- Vf: La velocidad de la fuente respecto al medio.
- V: La velocidad de la luz.

Si la fuente se acerca al observador se produce un acortamiento en la longitud de onda ( $\Delta\lambda$ ) por la cual el observador percibirá una longitud de onda:  $\lambda_0 = \lambda - \Delta\lambda$

Pero se sabe que:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad \text{y} \quad \Delta\lambda = \frac{V_f}{f} \quad \dots (2.1)$$

es decir:

$$\lambda_0 = \frac{V}{f} - \frac{V_f}{f} = \frac{V - V_f}{f} \quad \dots (2.2)$$

La frecuencia percibida por el observador será:

$$f_0 = \frac{v}{\lambda_0} \quad \dots (2.3)$$

por lo tanto:

$$f_0 = \frac{fv}{v - v_f} \quad \dots (2.4)$$

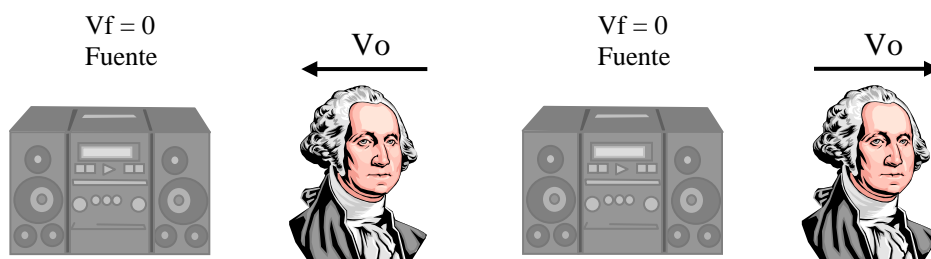
Si la fuente se aleja su longitud de onda sufre un alargamiento y por tanto:

$$f_0 = \frac{fv}{v + v_f} \quad \dots (2.5)$$

Si la fuente alcanza en su movimiento la velocidad del sonido, se dice que ha roto la barrera del sonido. Los aviones supersónicos tienen una configuración que les permite vencer la alta presión de aire que se produce con los frentes de onda superpuestos.

### Caso 2. El observador esta en movimiento y la fuente en reposo

En la figura 2.3 se observan dos figuras representativas las cuales muestran la manera en la cual se puede presentar el segundo caso: fuente en reposo y observador en movimiento, ya que como se percibe el observador puede estar acercándose o alejándose de la fuente.



**Figura 2.3** Observador en movimiento y fuente en reposo

Para este análisis se llamará:

- fo: La frecuencia percibida por el observador.
- f: La frecuencia propia de la fuente.
- Vo: La velocidad del observador respecto al medio.
- Vf: La velocidad de la fuente respecto al medio.
- V: La velocidad de la luz.

Si el observador se encuentra en reposo, percibe un sonido cuya frecuencia es  $f$ . Si se mueve hacia la fuente va al encuentro de las ondas y percibirá una frecuencia adicional ( $\Delta f$ ):

$$f_0 = f + \Delta f \quad \dots (2.6)$$

Pero se sabe que:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad \text{y} \quad \Delta f = \frac{v_0}{\lambda} \quad \dots (2.7)$$

es decir:

$$f_0 = \frac{v}{\lambda} + \frac{v_0}{\lambda} = \frac{v + v_0}{\lambda} \quad \dots (2.8)$$

pero como:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad \dots (2.9)$$

entonces:

$$f_0 = \frac{f(v + v_0)}{v} \quad \dots (2.10)$$

Si el observador se aleja, la frecuencia percibida por el observador va a disminuir en  $\Delta f$  porque al alejarse el observador, la cantidad de frentes de onda que lo alcanzan en la unidad de tiempo es menor. Al deducir la expresión para calcular la frecuencia percibida por el observador se obtiene:

$$f_0 = \frac{f(v - v_0)}{v} \quad \dots (2.11)$$

### **Caso 3. El observador y la fuente se mueven simultáneamente con respecto al medio.**

Para este análisis se llamará:

$f_0$ : La frecuencia percibida por el observador.

$F$ : La frecuencia propia de la fuente.

$v_0$ : La velocidad del observador respecto al medio.

$v_f$ : La velocidad de la fuente respecto al medio.

$V$ : La velocidad de la luz.





Si el observador y la fuente se dirigen uno hacia el otro, además de percibir una frecuencia adicional, la longitud de onda admitida varía y por lo tanto, la frecuencia percibida por el observador viene dada por:

$$f_0 = \frac{f(v + v_0)}{v + v_f} \quad \dots (2.12)$$

Cuando el observador y la fuente se mueven alejándose uno del otro, la frecuencia percibida por el observador será:

$$f_0 = \frac{f(v - v_0)}{v + v_f} \quad \dots (2.13)$$

el siguiente cuadro resume las situaciones que se pueden presentar:

 Obs.                      Fte. $f_0 = f \left( \frac{v + v_0}{v - v_f} \right)$	 Obs.                      Fte. $f_0 = f \left( \frac{v + v_0}{v + v_f} \right)$
 Obs.                      Fte. $f_0 = f \left( \frac{v - v_0}{v - v_f} \right)$	 Obs.                      Fte. $f_0 = f \left( \frac{v - v_0}{v + v_f} \right)$

### *Análisis matemático*

Para encontrar la relación que existe entre la frecuencia y la velocidad relativa entre fuente y receptor es necesario partir de la fórmula de distancia (d) que es igual a velocidad (v) por tiempo (t)

$$d = vt = \frac{v}{f_s'} \quad \dots (2.14)$$

podemos decir que si la fuente se está moviendo hacia la derecha con una velocidad  $V_s$  entonces la nueva distancia estará dada por:

$$d' = (v - v_s)t = v - \frac{v_s}{f_s} \quad \dots (2.15)$$

Si nosotros adicionalmente conocemos que la frecuencia que escucha el observador esta dada por:

$$f_0 = \frac{v}{d'} \quad \dots (2.16)$$

posteriormente podemos sustituir la distancia  $d'$  para obtener:

$$f_0 = \frac{v}{\frac{v - v_s}{f_s}} = \frac{vf_s}{v - v_s} \quad \dots (2.17)$$

Consideremos ahora la situación en la que la fuente se encuentra estacionaria y el observador en movimiento. En este caso la distancia no cambia, pero cada vez se pueden encontrar más ondas por unidad de tiempo en el camino.

$$f_0 = \frac{f_s(v + v_0)}{v} \quad \dots (2.18)$$

Si ambos, oyente y fuente, se encontraran en movimiento las ecuaciones deberían combinarse para llegar a:

$$f_0 = f_s \frac{v + v_0}{v - v_s} \quad \dots (2.19)$$

### ***Áreas de Aplicación***

#### **➤ *En la Astronomía***

En la astronomía el corrimiento Doppler es principalmente usado para medir la velocidad en la que objetos celestes se mueven. Ésto se logra gracias a que todo cuerpo que se encuentre en una temperatura mayor a los cero Kelvin emite ondas electromagnéticas.

El corrimiento Doppler sirve para determinar la velocidad a la que se mueven estrellas, planetas, cometas, plasmas, etc. Pues todos ellos, emiten algún tipo de radiación electromagnética.

Los colores del espectro electromagnético se asocian con la frecuencia de las ondas. Una onda de alta energía tiende a ser "azul", mientras que las ondas de menor frecuencia suelen ser más "rojas". La frecuencia de los objetos que se acercan a nosotros tiende a ser mayor, lo que es conocido como un "corrimiento al azul". Cuando los objetos se alejan su frecuencia parece disminuir y sufren de lo que es conocido como "corrimiento al rojo".

➤ *En el radar*

El radar es considerado un sensor remoto, ésto es, un sistema que es capaz de proveer información sobre objetos a distancias alejadas del equipo sensor.

El radar tiene dos características importantes:

- a) El emplea una onda electromagnética que se halla en la porción del espectro correspondiente a la *microonda* con longitudes de onda que van de 1 mm a 1m.
- b) Es de técnica activa, en el sentido que emite radiación y luego observa el objeto por medio de la radiación que la refleja. Este contraste con los métodos " pasivos " que dependen de la fuente natural de radiación como ser la emisión térmica.

Esta última característica representa una de las ventajas del radar: que no depende de la fuente de radiación externa, dado que él ilumina el objeto de interés.

Consecuentemente el radar puede ser usado tanto de día como de noche. Las microondas penetran la bruma, niebla, nieve, lluvia y granizo, estos dos últimos en menor grado, es decir que el radar tiene la habilidad de poder ver a través de las condiciones del entorno.

Puede medir la distancia a un objeto y determinar la velocidad de desplazamiento observando las distintas posiciones que toma en el tiempo.

La desventaja del radar incluye limitada habilidad de resolver detalles del objeto, si se compara con los métodos ópticos y por supuesto la percepción del color.

El funcionamiento del radar se basa en el corrimiento Doppler para calcular velocidad. Se llama corrimiento Doppler a la variación de la frecuencia que emite un emisor en movimiento.

Un ejemplo que vemos todos los días es un coche que se acerca, pasa a nuestro lado, para después alejarse: el sonido del motor es más agudo cuando se acerca, para pasar a ser más grave cuando comienza a alejarse. Además cuanto más rápido vaya, este efecto es más pronunciado.

Los radares de tráfico mandan una señal al coche que pasa y reciben una señal rebotada. En función de las diferencias de la frecuencia rebotada del coche que pasa pueden calcular la velocidad y hacer disparar una cámara fotográfica.

➤ *En la predicción del clima*

Para predecir el clima usando el corrimiento Doppler las estaciones metereológicas utilizan una antena de la cual emiten ondas de radio. Durante su viaje, la onda puede ser reflejada por gotas de lluvia u otros objetos en el aire. Después, la antena recibe las ondas que fueron rebotadas y utiliza el cambio en la frecuencia para determinar la velocidad de los objetos. Si una tormenta se acerca a la antena, ésta recibirá ondas reflejadas con una frecuencia mayor a las emitidas.

➤ *En la medicina y la Biología*

Aplicación del corrimiento Doppler en Biología

La medición de flujo por medio de láser es una nueva técnica usada para medir el flujo micro circulatorio en muchos tejidos diferentes. Las variaciones en el patrón son causadas por los latidos del corazón.

➤ *En los edificios inteligentes para la detección de movimiento*

La detección de movimiento también juega papel fundamental en la automatización de edificios, ya que permite desarrollar aplicaciones que permitirán por ejemplo:

- La apertura automática de puertas.
- El encendido y apagado automático de luces.

Existen diferentes tipos de sensores para detección de movimiento entre los cuales se encuentran los basados en microondas, los cuales hacen uso directo del corrimiento Doppler para la detección de movimiento y presentan la ventaja de no depender de la temperatura. Los módulos Doppler son sensores de radar que operan en modo de onda continua (CW). Su función principal es descubrir movimientos dentro de su rango de sensibilidad sin medir la distancia absoluta al objeto.

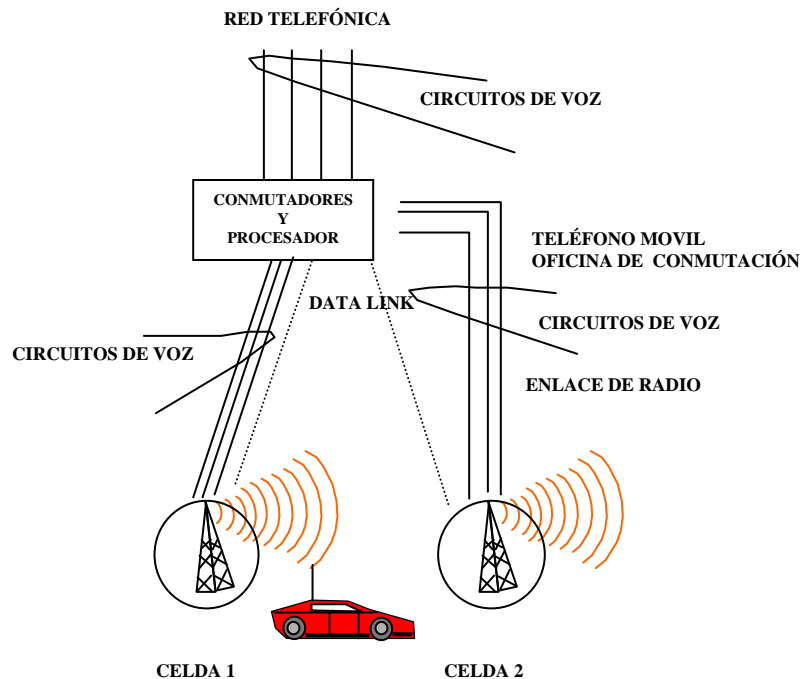


## CAPÍTULO 3

### LOS SISTEMAS DE COMUNICACIÓN PERSONAL INALÁMBRICOS ANTE EL CORRIMIENTO DOPPLER.

#### INTRODUCCIÓN

Un sistema de comunicación personal inalámbrico básico consta de tres partes: una unidad móvil, un área de celdas y una Oficina de Conmutación Telefónica Móvil (MTSO – Mobile Telephonic Communication Office) como se muestra en la Figura 3.1, con conexiones para enlazar los tres subsistemas.



**Figura 3.1.** Estructura de un sistema de comunicación personal inalámbrico básico.

1. **Unidad móvil:** Una unidad de teléfono móvil contiene una unidad de control, un "transceiver", y un sistema de antena.
2. **Área de Celdas:** El área de celdas provee una interfaz entre el MTSO y la unidad móvil. Tiene una unidad de control, gabinetes de radio, antenas, una planta de energía y terminales de data.
3. **MTSO:** La oficina de conmutación, es el elemento coordinador central de todas las áreas de celdas, contiene el procesador celular y el conmutador celular, hace interfaz con las oficinas zonales de las compañías telefónicas, controla el procesamiento de las llamadas y el manejo de las actividades de facturación.
4. **Conexiones:** El radio y los enlaces de data de alta velocidad conectan los tres subsistemas. Cada unidad móvil puede únicamente utilizar un canal a la vez para su enlace de comunicación. Pero el canal no es fijo este puede ser cualquiera de la banda

asignada para el área de servicio, con cada ubicación teniendo la capacidad de multicanal que puede conectarse simultáneamente a muchas unidades móviles.

El MTSO es el corazón del sistema móvil celular. Su procesador proporciona coordinación central y administración celular.

La conmutación celular, la cual puede ser analógica o digital, conmuta llamadas para conectar suscriptores móviles a otros suscriptores móviles y a otras redes telefónicas nacionales. Éste usa líneas troncales de voz similares a las de las compañías telefónicas. Puede también contener enlaces de datos proporcionando enlaces supervisados entre los procesadores y los conmutadores, y entre las áreas de celdas y el procesador. Los enlaces de radio portan la voz y la señalización entre la unidad móvil y las áreas de celdas. Los enlaces de datos de alta velocidad no pueden ser transmitidos sobre las líneas troncales de teléfonos estándar y por lo tanto tienen que ser usados con enlaces de microondas o líneas con cables. Los enlaces de radio, las microondas y las líneas con cables portan voz y datos entre las áreas de celdas y el MTSO.

Actualmente las transmisiones inalámbricas constituyen una eficaz y poderosa herramienta que permite la transferencia de voz, datos y video, sin la necesidad de utilizar cables para establecer la conexión.

Esta transferencia de información es lograda a través de la emisión de ondas de radio, permitiendo así, tener dos grandes ventajas las cuales son la movilidad y flexibilidad del sistema en general.

Hoy en día los Sistemas Inalámbricos han experimentado diversos cambios, buscando siempre la mayor flexibilidad y calidad en sus servicios, en lo que se refiere a cobertura y distancia, estos cambios han traído consigo diferentes infraestructuras tecnológicas, minimizando posibles inconvenientes que se pueden tener en el instante de tiempo en que se transmiten o reciben las diferentes señales generadas por dichos sistemas. Sin embargo, existen inconvenientes producto de los movimientos que se llevan a cabo en los receptores, ya sea el que transmite la señal o el que la recibe, los cuales no se pueden eliminar tecnológicamente y son producto de la propagación de la señal en el canal de transmisión.

Este tipo de problemas se presentan a menudo en los Sistemas Inalámbricos y si bien para algunos sistemas es beneficioso ( Radar ) para otros no, como es el caso de la Radio.

La Propagación de la Radio se caracteriza por tres de estos efectos, conocidos como:

- Multipath Fading (Desvanecimiento de Múltiples Trayectorias), el cual es descrito por:
  - Envelope Fading (Desvanecimiento Envolvente)
  - Doppler Spread (Corrimiento Doppler)
  - Time-Delay Spread (Dispersión por Tiempo de Retardo).
- Shadowing (Sombras).
- Path Loss (Pérdidas de Trayectorias).

En la evolución de las redes de telecomunicación, una estrategia actual es dotar a los usuarios de movilidad, de forma que puedan establecer una comunicación desde cualquier lugar. Ello es posible mediante el empleo de la radio para establecer el enlace entre los elementos a comunicarse. Como ejemplos usuales se pueden considerar los sistemas GSM y DECT.

### DESCRIPCIÓN DEL MEDIO DE TRANSMISIÓN DE RADIO MÓVIL.

En general, la pérdida de la ruta de la propagación se incrementa no solo con la frecuencia sino con la distancia. Si la altura de la antena en el área de las celdas es de 30 a 100 m y la unidad móvil esta aproximadamente a 3 m, y la distancia entre el área de la celda y la unidad móvil es usualmente 2 Km o más, entonces la incidencia angular de la onda directa y de la onda reflejada es muy pequeña, ver Figura 3.2. El ángulo de incidencia de la onda directa es  $\theta_1$  y el ángulo de incidencia de la onda reflejada es  $\theta_2$ . El ángulo  $\theta_1$  es conocido como ángulo de elevación. La propagación de la pérdida de ruta debería ser de 40 dB/dec, donde "dec" es una abreviación de década, un periodo de 10 años. Ésto significa que una pérdida de 40-dB en una señal recibida será observada por la unidad móvil como si ésta se moviera de 1 a 10 Km. Por lo tanto C es inversamente proporcional a  $R^4$ .

$$C \propto R^{-4} = \alpha R^{-4} \quad \dots (3.1)$$

Donde:

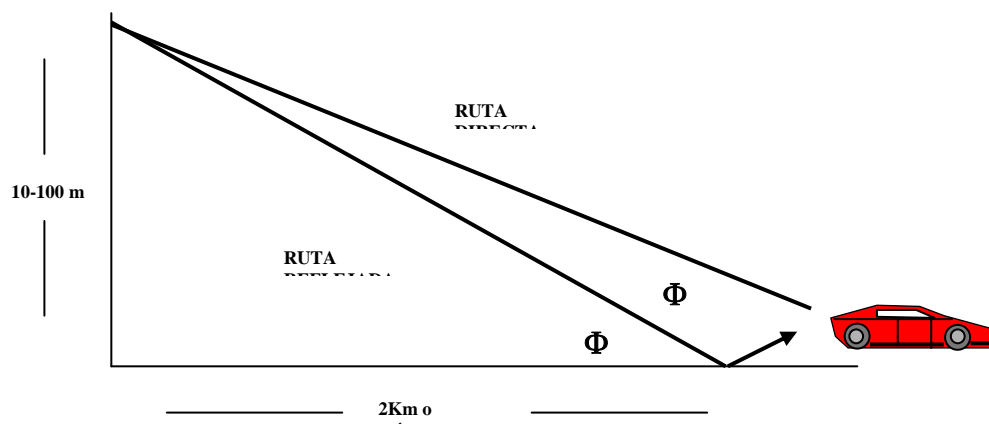
C = Es la energía portadora recibida.

R = Es la distancia medida desde el transmisor hasta el receptor.

$\alpha$  = Una constante.

La diferencia entre la recepción de la energía en dos diferentes distancias R1 y R2 es:

$$\frac{C_2}{C_1} = \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^{-4} \quad [\text{adm}] \quad \dots (3.2)$$



**Figura 3.2** Representación de la incidencia angular de la onda directa y de la onda reflejada.

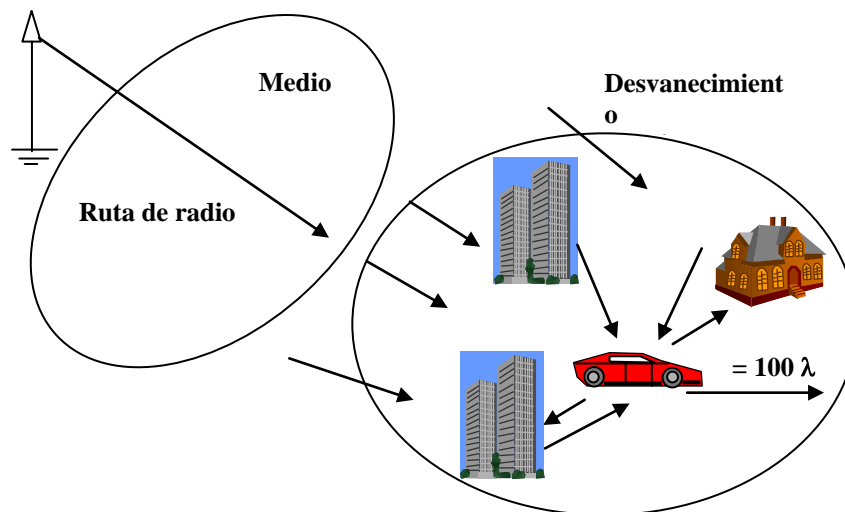
## ***ESTUDIO DEL DESVANECIMIENTO DE MÚLTIPLES TRAYECTORIAS.***

A continuación se analizará más a fondo lo que es el desvanecimiento de múltiples trayectorias, debido a que este efecto permitirá comprender la manera en la cual el corrimiento Doppler afecta a los sistemas de comunicación personales inalámbricos.

Si la altura de la antena de la unidad móvil es mas baja que las dimensiones de las antenas cercanas, y la longitud de onda de la frecuencia portadora es mucho menor que las dimensiones de la estructura cercana, entonces las ondas de multitrayecto son generadas. En la unidad móvil las sumas de las ondas multitrayecto causan un fenómeno de desvanecimiento de la señal. La señal fluctúa en un rango de 40 dB (10dB sobre el promedio de la señal y 30 dB por debajo del promedio de la señal). Se puede visualizar la nulidad de la fluctuación en la banda base en la mitad de la longitud de onda en el espacio, pero todas las nulidades no ocurren en el mismo nivel. Si la unidad móvil se mueve rápido, la tasa de fluctuación es rápida.

### ***Características del Desvanecimiento de Múltiples Trayectorias.***

El desvanecimiento Rayleigh es también llamado desvanecimiento de múltiples trayectorias o multitrayecto en el ambiente radio móvil. Cuando las ondas multitrayecto rebotan en los edificios y casas forman muchos pares de ondas en el espacio, ver Figura 3.3. Estos pares de ondas son sumadas y se convierten en una estructura de desvanecimiento de onda. Cuando una unidad móvil es aun estacionaria, su receptor solo recibe una señal fuerte en el sitio, así la señal constante es observada. Cuando la unidad móvil se mueve, la estructura de desvanecimiento de la onda en el espacio es recibida, ésto es un desvanecimiento multitrayecto. Los registros de los desvanecimientos serán más rápidos cuando el vehículo se mueva más rápido.



**Figura 3.3** Desvanecimiento multitrayecto.

Por su intensidad y al hecho de ser selectivo en frecuencia el desvanecimiento multitrayecto ejerce una marcada influencia en las radiocomunicaciones. La existencia de dos o más trayectos de propagación, además del principal, se debe a reflexiones en el suelo o en capas atmosféricas.

La reflexión especular o difusa en el suelo suele ser previsible y puede contrarrestarse en cierto grado. Cuando en las componentes que alcanzan el receptor existe una dominante, la resultante tiende a distribuirse según una estadística de Rice. En este caso existe línea de vista entre el transmisor y el receptor.

Si, en cambio, las componentes tienen amplitudes instantáneas similares, la resultante es de tipo Rayleigh. En este caso no existe línea de vista entre el transmisor y el receptor.

La propagación multitrayecto genera fluctuaciones profundas y rápidas, en el nivel de la señal recibida.

El multitrayecto causa tres aspectos fundamentales:

- ◆ Cambios bruscos en el nivel de la señal sobre intervalos de tiempo corto y distancias pequeñas .
- ◆ Modulación aleatoria de frecuencia debido al efecto Doppler en los diferentes trayectos .
- ◆ Dispersión de tiempo (ecos) causado por los retardos del multitrayecto.

Estos tres aspectos son los que se conocen como efectos del desvanecimiento.

### ***Movimientos Locales y Desplazamiento Doppler.***

A continuación se examinará el comportamiento de la señal en el dominio de la frecuencia para mostrar los efectos de los movimientos sobre las características de la señal recibida.

Es importante mencionar que en aire existen diversos factores que afectan a la calidad de la señal recibida como son:

1. ***La atenuación de la señal:*** Estas pérdidas son proporcionales a la distancia ( $1/R^n$ ) donde R es la distancia y n es un número positivo generalmente entre 2 y 6 en el espacio libre  $n = 2$  y las pérdidas vienen dadas (en dB) por:

$$L_{fs} = \log_{10} f_c + \log_{10} R + 324 \quad \dots (3.3)$$

2. ***La señal recorre diversos caminos en su propagación "Multipath"***(ver figura 3.3): Un ejemplo de este fenómeno son las imágenes fantasmas en el receptor de televisión. Las diferentes contribuciones se suman o restan en función de la fase. Este problema se evidencia por fluctuaciones en la amplitud de la señal, señales fuertes y débiles mientras el móvil se mueve de un sitio a otro. Los entornos humanos son propensos a múltiples reflexiones y las áreas rurales sólo tienen una

o unas pocas reflexiones por cada señal. Debido al multipath se tienen dos tipos de desvanecimiento, selectivo (en función de la frecuencia): cada frecuencia llega al receptor en diferente momento, dando como lugar la dispersión de la señal en el tiempo (entre  $0.1 \mu\text{s}$  y  $20 \mu\text{s}$ ) y plano, cuando hay muchos obstáculos cerca del móvil dando como resultado que la fase y la amplitud de las señales que llegan son diferentes.

3. **Desvanecimiento lento:** Es debido a onda refractadas debidas a un obstáculo entre transmisor y receptor.
4. **Desvanecimiento tipo Rayleigh:** Produce desplazamientos aleatorios en la fase que se traducen en fluctuaciones muy rápidas del nivel de la señal.
5. **El corrimiento Doppler por el movimiento relativo entre emisor y receptor:** Es diferente en los distintos caminos de propagación lo que provoca una modulación de frecuencia aleatoria de la señal recibida.

El corrimiento Doppler por el movimiento relativo entre emisor y receptor es bien conocido de los fundamentos de la física y se presenta cada vez que un transmisor y un receptor están en un movimiento relativo, la frecuencia portadora recibida es desplazada relativamente a la frecuencia portadora del transmisor. Este desplazamiento de frecuencia es el corrimiento Doppler de propagación de onda entre los puntos no estacionarios. Ahora se mostrara como el corrimiento Doppler constituye una fuente de desvanecimiento de la señal en un ambiente de multicamino.

La Figura 3.4, muestra un ejemplo típico en el cual un terminal fijo y uno portátil se están comunicando sobre un enlace de radio. La distancia entre el transmisor y el receptor es  $d_0$  y el terminal portátil se mueve con una rapidez  $v_o$  hacia el terminal fijo. Si se asume que el teléfono portátil esta transmitiendo un tono en la frecuencia  $f_c$  y la amplitud de la señal recibida es  $A_r$ . Si el transmisor es estacionario, la señal recibida es representada por:

$$r(t) = \text{Re al} \left[ A_r e^{j2\pi f_c (t-t_0)} \right] \quad \dots (3.4)$$

donde:

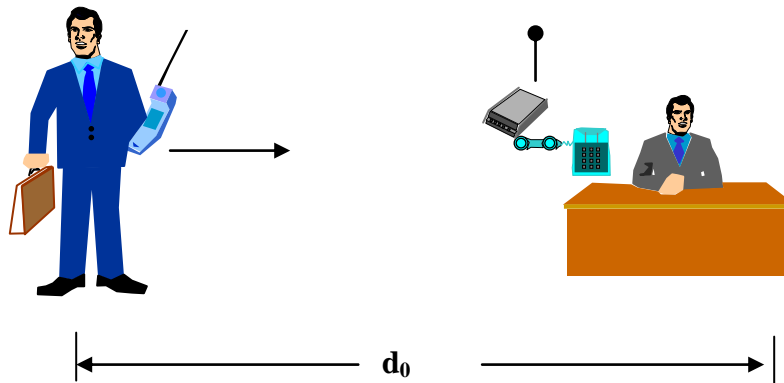
$$t_0 = \frac{d_0}{c} \quad \dots (3.5)$$

siendo:

$t_0$  : Tiempo necesario para que la onda de radio se propague de transmisor a receptor.

$d_0$  : Distancia entre transmisor y receptor.

$c$  : Velocidad de la luz.



**Figura 3.4** Comunicación entre terminal fijo y portátil en un enlace de radio.

Como el transmisor se mueve hacia el receptor, el tiempo de propagación cambiará con el tiempo de la siguiente manera:

$$\gamma(t) = \frac{d(t)}{c} = \frac{(d_0 - v_m t)}{c} = t_0 - \frac{v_m}{c} * t \quad \dots (3.6)$$

La señal recibida es entonces obtenida de:

$$r(t) = A_r * e^{j2\pi f_c [t - \tau(t)]} = A_r * e^{j[(2\pi f_c + f_d)t - \phi]} \quad \dots (3.7)$$

donde:

$$\phi = 2\pi f_c t_0 \quad \dots (3.8)$$

es un desplazamiento constante de fase y:

$$f_d = \frac{f(v + v_0)}{v} \quad \dots (3.9)$$

$$f_d = \frac{f(v - v_0)}{v} \quad \dots (3.10)$$

es un desplazamiento en la frecuencia percibida por el observador, comúnmente conocida como corrimiento Doppler. Como se observa, el corrimiento Doppler es positivo o negativo dependiendo de que el observador se este moviendo hacia la estación terrena o se este alejando.

## ***LA PROPAGACIÓN DOPPLER***

La propagación Doppler es relacionada al conjunto de desplazamientos Doppler de los componentes multicanal, cada desplazamiento es  $V_o/\lambda$ , donde  $V_o$  es la velocidad aproximada del objeto en movimiento y  $\lambda$  es la longitud de onda de la frecuencia portadora. La propagación del retardo del multicanal rms limita la tasa de transmisión R de una simple técnica de modulación a un valor aproximado:  $R=0.1/\tau$  rms. En general, las medidas son desarrolladas usando técnicas y equipos de banda ancha y banda corta y los resultados son usados para desarrollar modelos de banda ancha y banda corta respectivamente.

Las medidas de banda corta son hechas cuando la tasa de transmisión de la aplicación esta por debajo del ancho de banda del canal. El ancho de banda coherente dentro del canal de radio para distancias menores de 100 metros entre el transmisor y receptor esta alrededor de unos pocos Mhz, lo cual significa que la tasa de transmisión esta sobre varios cientos de Kbits/s que son considerados de banda corta . Para aplicaciones digitales inalámbricas la tasa de transmisión esta siempre por debajo de estos valores. Como resultado, las aplicaciones de telefonía han dado la principal motivación para las medidas y modelaje de banda corta en áreas internas.

La potencia recibida siempre varía con pequeños cambios locales, sobre el orden de la longitud de onda de la frecuencia portadora, en la ubicación del transmisor y receptor o en el movimiento de los objetos cercanos. Sin embargo, el promedio de la potencia recibida sobre una pequeña área es relacionada a la distancia desde el transmisor al centro de las áreas de recepción. Las características del canal extraída desde las medidas del canal de banda corta son:

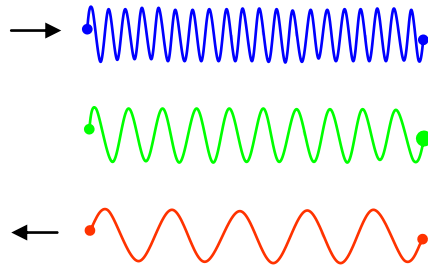
- 1) La relación entre la distancia y el promedio de la potencia recibida
- 2) Las estadísticas de las fluctuaciones en la potencia de la señal recibida en las áreas local y extendida.
- 3) La propagación Doppler la cual provee una medida de la tasa de desvanecimiento del canal .

Los "modem" son diseñados para operar con cierta tolerancia a las fluctuaciones en la potencia de la señal recibida . El rango de operación del receptor y, consecuentemente, el tamaño de las celdas en una arquitectura celular, depende de la relación distancia potencia. Esta relación en áreas dentro de las casas depende de las paredes y materiales utilizados para su construcción. Las estadísticas de las fluctuaciones de amplitud proveen información del calculo de la probabilidad de error y la probabilidad de ruptura de la comunicación para diferentes técnicas de modulación. La propagación Doppler es útil en las especificaciones y diseño de algoritmos tales como control de la ganancia automática y circuitos de recuperación de fase o tiempo.

El Corrimiento Doppler es definido como el ancho espectral de la portadora recibida cuando una simple portadora sinusoidal es transmitida dentro de un canal de múltiples trayectorias. Es decir, cuando un transmisor o un receptor está en movimiento, la frecuencia de la portadora recibida presenta variaciones con respecto a la frecuencia de la portadora



que se transmitió, produciendo de esta manera la pérdida parcial por instantes de tiempo o completa de la señal que fue transmitida. Si la distancia entre el transmisor y el receptor aumenta, la frecuencia disminuye, cuando la frecuencia aumenta la distancia entre el transmisor y el receptor disminuye; esto se observa más claramente en la figura 3.5.



**Figura 3.5** Efecto de la Propagación de la onda.

El máximo Corrimiento Doppler ocurre para una onda que viene desde una dirección opuesta a la dirección de la antena en movimiento. Es decir, el Corrimiento Doppler esta determinado por:

$$f_d = \frac{f_c(c + v_0)}{c} \quad \dots (3.11)$$

$$f_d = \frac{f_c(c - v_0)}{c} \quad \dots (3.12)$$

Donde :

$\pm$  : Indica si el desplazamiento se acerca o aleja del transmisor fijo (la estación terrena).

$f_c$  : Es la frecuencia de la portadora .

$C$ : es la velocidad de la luz.

$V_0$  : es la velocidad del objeto en movimiento.

Tales movimientos en dirección a la antena producen ondas reflejadas individualmente con desplazamientos de fase ( variaciones de tiempo ). Esto origina dificultad en la recepción, que se deben de compensar. Para poder lograr esto, lo ideal sería recibir distintas ondas con diferentes desplazamientos, de manera tal que los cambios relativos de fase se produzcan constantemente, afectando la amplitud de la señal resultante. El Corrimiento Doppler determina las variaciones de amplitudes de la señal resultante.

Al receptor llegan diferentes ondas con sus propios desplazamientos de fase; por lo tanto cada una con su propio Corrimiento Doppler, con distribuciones no uniformes (  $0, 2\pi$  ); independientemente de las otras ondas de llegada.

## CAPÍTULO 4

### ANÁLISIS DEL PROBLEMA

#### *MEDIDA DE LA PROPAGACIÓN DOPPLER*

Considerando que el corrimiento Doppler es uno de los aspectos que describen al desvanecimiento de múltiples trayectorias, por lo tanto se puede decir que la propagación multitrayecto en un entorno de variación temporal produce dispersión en frecuencia debido a dos aspectos:

- a) Por el movimiento del receptor
- b) Por cambios en el medio

En el caso que nos ocupa es posible considerar que se está realizando una comunicación en un solo sentido (simplex), ésta es la situación más sencilla debido a que solo se cuenta con dos posibilidades, aumento ó disminución de frecuencia al acercarse ó alejarse el móvil de la estación terrena.

Por lo tanto de acuerdo a lo visto en el capítulo 2, el caso a estudiar es cuando el observador se encuentra en movimiento y la fuente en reposo; con objeto de determinar el valor que tomará el corrimiento Doppler para el caso de interés se hará uso de las siguientes expresiones matemáticas:

$$f_d = \frac{f_c(c + v_0)}{c} \quad \dots (4.1)$$

$$f_d = \frac{f_c(c - v_0)}{c} \quad \dots (4.2)$$

donde:

- $f_d$  : Frecuencia Doppler
- $f_c$  : Frecuencia de la fuente
- $v_0$  : Velocidad del observador
- $c$  : Velocidad de la luz

La expresión 4.1 indica que el observador se está acercando a la estación terrena y la expresión 4.2 indica que el observador se está alejando de la estación terrena.

Empleando el concepto de "reuso de frecuencias" se observa que con esto la capacidad de un canal de telefonía móvil se incrementa, es decir, el mismo conjunto de frecuencias se pueden asignar a más de una célula, siempre y cuando las células estén a una cierta distancia de separación, permitiendo así que un gran número de usuarios compartan un número limitado de canales de uso común, dicho sistema trabaja en un rango de frecuencia de 800 a 900 MHz. y es uno de los sistemas inalámbricos que se ve más afectado por el

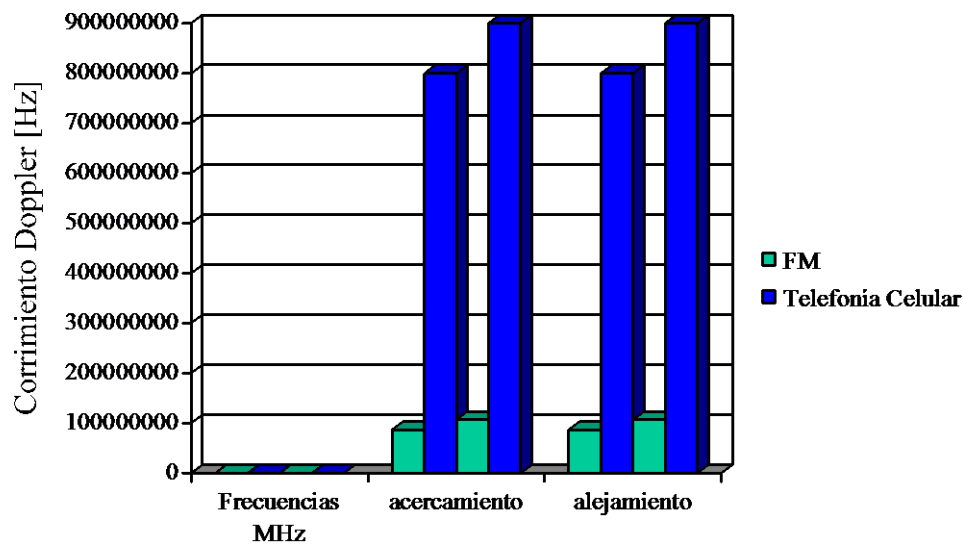
corrimiento Doppler. Si la comparamos con la banda FM que posee las frecuencias comprendidas entre 87 - 107 MHz. Es posible darse cuenta que el corrimiento Doppler es mayor en las bandas de frecuencias altas, es decir, a mayor frecuencia y mayor velocidad, se posee un mayor corrimiento Doppler.

Para una velocidad fija de 3 Km/h y las bandas respectivas de frecuencias se procederá a comparar el corrimiento Doppler para los sistemas FM y Telefonía Celular; todo esto se realizará empleando las expresiones anteriores, con lo cual se ejemplificarán tanto el acercamiento como el alejamiento del observador con la estación terrena; como se muestra en la tabla 4.1 y en la figura 4.1:

	Frecuencias [Hz]	Corrimiento Doppler [Hz] (observador acercándose a estación terrena)	Corrimiento Doppler [Hz] (observador alejándose a estación terrena)
FM	87E6	8.7E7	86999999.76
	107E6	10.7E7	106999999.7
Telefonía Celular	800E6	8E8	799999997.8
	900E6	9E8	899999997.5

**Tabla 4.1** Resultados de la comparación del corrimiento Doppler para FM y Telefonía celular.

Gráficamente:



**Figura 4.1** Resultados de la comparación del corrimiento Doppler para FM y Telefonía celular.

Como podemos apreciar tanto en la tabla como en la gráfica los sistemas inalámbricos que trabajan en las frecuencias altas, son las que se ven mas afectados por el corrimiento Doppler, sin embargo la tecnología de sistemas inalámbricos encierra dos grandes grupos o categorías de sistemas:

- a) los sistemas con base terrestre
- b) los de base satelital

en los de base satelital la transmisión es unidireccional y mas específico el Radar se beneficia con el corrimiento Doppler que afecta a la observación realizada cuando existe movimiento relativo entre objeto y sensor, se registran los pulsos de un mismo punto de la superficie terrestre en dos momentos distintos de la trayectoria, con lo que la resolución es equivalente a la que se obtendría con una antena de similar longitud a la distancia existente entre ambos puntos, caso contrario a los sistemas con base terrestre que se ven seriamente afectados por dicho corrimiento.

Los sistemas de base satelital se han utilizado desde hace mucho tiempo para ofrecer servicios de telefonía, video, redes privadas y comunicación de datos. Aunque el mercado de transmisión por satélite estuvo limitado en el pasado, el explosivo crecimiento de los servicios de datos de banda ancha en todo el mundo ha renovado el interés por los sistemas por satélite.

El corrimiento Doppler es inherente en todos los sistemas de comunicación personal móviles, pero es únicamente significativo para los aficionados a frecuencias extremadamente altas, o para operadores de satélite. Todos los operadores de satélites necesitan tomar en cuenta el corrimiento Doppler.

Los enlaces de comunicación satelital sufren un corrimiento Doppler de frecuencia relativamente grande. Las consecuencias de este efecto dependen del tipo de modulación, técnica de multiplexaje y métodos de accesos satelitales. El corrimiento Doppler es más perjudicial para los enlaces de comunicación digital, los cuales requieren de una demodulación altamente coherente.

Teniendo en cuenta que la órbita geosíncrona se está congestionando progresivamente y se ha incrementado la necesidad de comunicaciones móviles, se han considerado seriamente los tipos de órbitas elípticas inclinadas, las cuales ofrecen al usuario características posicionales especialmente elaboradas. Además, dentro de las comunicaciones satelitales, se está considerando una asociación con el concepto de satélites repetidores de datos.

Se han considerado frecuencias mayores que las de la banda J para los enlaces satelitales, debido a que con esto se minimiza el corrimiento Doppler; pero, la factibilidad de estas frecuencias, particularmente para órbitas de baja elevación, puede ser cuestionada, debido a los problemas de propagación que presentan dichas bandas.

Existen ciertas bandas de frecuencia y órbitas con características que las hacen particularmente atractivas; por ejemplo, la banda de 60 GHz que ofrece capacidad de comunicación intersatelital y protección contra la interferencia de la tierra debida a la alta

absorción del oxígeno atmosférico. Esta banda de frecuencias es además considerada para comunicaciones personales fijas o móviles a corta distancia. De todo lo anterior, se puede concluir que los sistemas de comunicaciones satelitales futuros podrán satisfacer los requerimientos fijos o móviles, si usan una gran variedad de tipos de órbitas y bandas de frecuencia.

El uso de orbitas elípticas inclinadas para facilitar este complejo escenario de comunicaciones es una propuesta viable, sin embargo, tiene que solucionarse el problema del corrimiento de frecuencia Doppler .

Las órbitas elípticas inclinadas son mejores que las órbitas circulares bajas; porque, en este último caso, el tiempo de acceso es limitado; además, las terminales móviles requerirían ya sea antenas de rastreo relativamente caras o antenas de haz ancho y de baja ganancia.

La razón por la cual resulta importante estudiar el corrimiento Doppler en satélites es que las frecuencias de las señales de los satélites están afectadas por el constante movimiento de los mismos. A medida que el satélite se acerca, su frecuencia de bajada aumenta y cuando se aleja, disminuye.

Es por ello que el corrimiento Doppler es un buen ejemplo para entender que todo esta en constante movimiento, mientras nosotros estamos “quietos” la Tierra gira en torno a su eje a casi 2000 km/h, la Tierra gira en torno al sol a unos 80 000 km/h y el sol gira en la vía láctea a más de 500 000 km/h. En otras palabras: todos los objetos del universo giran entorno al resto. En términos absolutos: aunque estemos quietos, estamos en constante movimiento.

A continuación se mostrará un desarrollo matemático el cual nos permite demostrar la existencia del corrimiento Doppler tanto para órbitas circulares no geoestacionarias, como para órbitas elípticas ecuatoriales.

### *Caso 1*

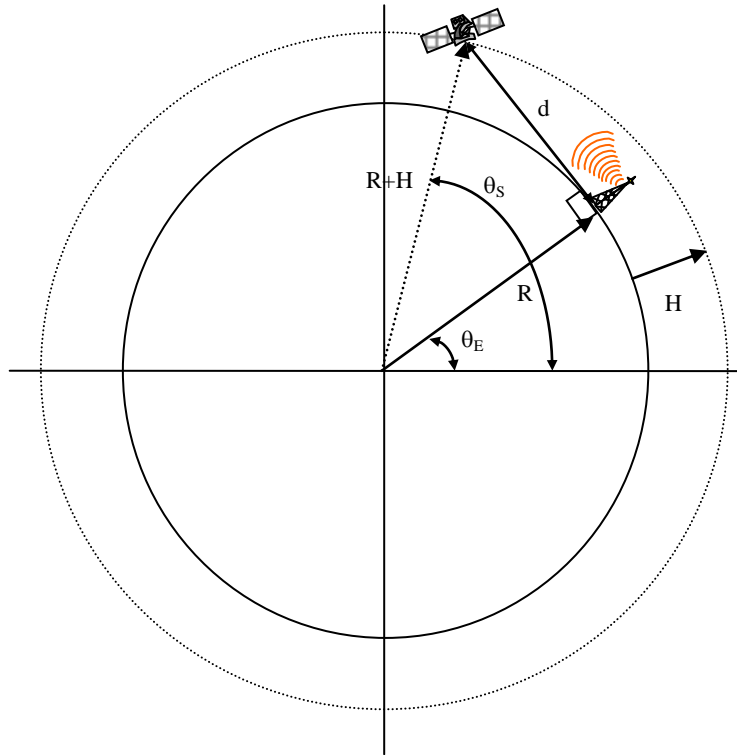
- **Órbita circular en un plano ecuatorial**

En este primer caso se realizará el desarrollo matemático que permita demostrar la presencia del corrimiento Doppler en órbitas circulares, para lograr este objetivo será necesario hacer uso de la figura 4.2 la cual muestra los parámetros que deben considerarse en el estudio de una órbita circular en donde:

R: Radio terrestre ( 6378 [km] )

H: altura de la órbita (800 [km] )

d: Distancia de la terrena al satélite [Km]



**Figura 4.2** Parámetros de una órbita circular ecuatorial.

Siendo:

$$\omega_E = \frac{2\pi}{86400} \text{ [rad/s]} \quad \dots (4.3)$$

$$\omega_S = \frac{2\pi}{T} \text{ [rad/s]} \quad \dots (4.4)$$

$$T = 5063 \left( \frac{R+H}{R} \right)^{3/2} \text{ [s]} \quad \dots (4.5)$$

donde:

$\omega_E$  : Velocidad angular de la estación terrena

$\omega_S$  : Velocidad angular del satélite

$T$  : Período del satélite

sustituyendo 4.5 en 4.4 se tiene:

$$\omega_s = \frac{2\pi}{5063 \left( \frac{R+H}{R} \right)^{3/2}} \dots (4.6)$$

Por otro lado las coordenadas de la terrena estarían dadas por:

$$X_E = R \cos \theta_E \dots (4.7)$$

$$Y_E = R \sin \theta_E \dots (4.8)$$

Con:

$$\theta_E = \omega_E t \dots (4.9)$$

sustituyendo 4.3 en 4.9 se tiene:

$$\theta_E = \frac{2\pi}{86400} t \dots (4.10)$$

Ahora sustituyendo 4.10 en 4.7 y 4.8 se tiene:

$$X_E = R \cos \left( \frac{2\pi}{86400} t \right) \dots (4.11)$$

$$Y_E = R \sin \left( \frac{2\pi}{86400} t \right) \dots (4.12)$$

Del mismo modo se tienen las coordenadas del satélite las cuales serían:

$$X_s = (R+H) \cos \theta_s \dots (4.13)$$

$$Y_s = (R+H) \sin \theta_s \dots (4.14)$$

Con:

$$\theta_s = \omega_s t \dots (4.15)$$

Sustituyendo 4.6 en 4.15 se tiene:

$$\theta_s = \frac{2\pi}{5063 \left( \frac{R+H}{R} \right)^{3/2}} t \quad \dots (4.16)$$

Ahora sustituyendo 4.16 en 4.13 y 4.14 se tiene:

$$X_s = (R+H) \cos \left( \frac{2\pi}{5063 \left( \frac{R+H}{R} \right)^{3/2}} t \right) \quad \dots (4.17)$$

$$Y_s = (R+H) \text{sen} \left( \frac{2\pi}{5063 \left( \frac{R+H}{R} \right)^{3/2}} t \right) \quad \dots (4.18)$$

La expresión para determinar la distancia de la terrena al satélite esta dada por:

$$d = \sqrt{(X_s - X_E)^2 + (Y_s - Y_E)^2} \quad \dots (4.19)$$

la cual corresponde a la distancia entre dos puntos.

Sustituyendo 4.11, 4.12, 4.17 y 4.18 en 4.19 se tiene:

$$d = \sqrt{\left( (R+H) \cos \left( \frac{2\pi}{5063 \left( \frac{R+H}{R} \right)^{3/2}} t \right) - R \cos \left( \frac{2\pi}{86400} t \right) \right)^2 + \left( (R+H) \text{sen} \left( \frac{2\pi}{5063 \left( \frac{R+H}{R} \right)^{3/2}} t \right) - R \text{sen} \left( \frac{2\pi}{86400} t \right) \right)^2} \quad \dots (4.20)$$

Desarrollando los cuadrados y simplificando se tiene:

$$d = \sqrt{\left( (R+H)^2 + R^2 - 2R(R+H) \left( \cos \left( \frac{2\pi}{5063 \left( \frac{R+H}{R} \right)^{3/2}} t \right) \cos \left( \frac{2\pi}{86400} t \right) + \text{sen} \left( \frac{2\pi}{5063 \left( \frac{R+H}{R} \right)^{3/2}} t \right) \text{sen} \left( \frac{2\pi}{86400} t \right) \right) \right)} \quad \dots (4.21)$$

Empleando la siguiente identidad:

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos\alpha \cos\beta \mp \text{sen}\alpha \text{sen}\beta$$

se tiene:

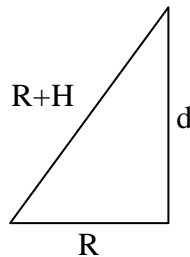


$$d = \sqrt{(R+H)^2 + R^2 - 2R(R+H) \cos \left( \left( \frac{2\pi}{5063 \left( \frac{R+H}{R} \right)^{3/2}} - \frac{2\pi}{86400} \right) t \right)} \quad \dots (4.22)$$

Derivando para obtener la velocidad se tiene:

$$V = \frac{\partial d}{\partial t} = \frac{R(R+H) \left( \frac{2\pi}{5063 \left( \frac{R+H}{R} \right)^{3/2}} - \frac{2\pi}{86400} \right) \operatorname{seno} \left( \left( \frac{2\pi}{5063 \left( \frac{R+H}{R} \right)^{3/2}} - \frac{2\pi}{86400} \right) t \right)}{\sqrt{(R+H)^2 + R^2 - 2R(R+H) \cos \left( \left( \frac{2\pi}{5063 \left( \frac{R+H}{R} \right)^{3/2}} - \frac{2\pi}{86400} \right) t \right)}} \quad \dots (4.23)$$

Para determinar el tiempo de cobertura es necesario considerar que la distancia “d” y la distancia “R” deben formar un ángulo recto, ver figura 4.3, con esta consideración es posible hacer uso del teorema de Pitágoras con el cual se obtiene lo siguiente :



**Figura 4.3** Uso del teorema de Pitágoras para determinar el tiempo de cobertura.

$$d = \sqrt{(R+H)^2 - R^2} \quad \dots (4.24)$$

Igualando la ecuación 4.24 a la 4.22 se tiene:

$$\sqrt{((R+H)^2 - R^2)} = \sqrt{(R+H)^2 + R^2 - 2R(R+H) \cos \left( \left( \frac{2\pi}{5063 \left( \frac{R+H}{R} \right)^{3/2} - \frac{2\pi}{86400}} \right) t \right)} \dots (4.25)$$

elevando al cuadrado ambos términos:

$$(R+H)^2 - R^2 = (R+H)^2 + R^2 - 2R(R+H) \cos \left( \left( \frac{2\pi}{5063 \left( \frac{R+H}{R} \right)^{3/2} - \frac{2\pi}{86400}} \right) t \right) \dots (4.26)$$

Simplificando resulta:

$$-2R^2 = -2R(R+H) \cos \left( \left( \frac{2\pi}{5063 \left( \frac{R+H}{R} \right)^{3/2} - \frac{2\pi}{86400}} \right) t \right) \dots (4.27)$$

$$\frac{2R^2}{2R(R+H)} = \cos \left( \left( \frac{2\pi}{5063 \left( \frac{R+H}{R} \right)^{3/2} - \frac{2\pi}{86400}} \right) t \right) \dots (4.28)$$

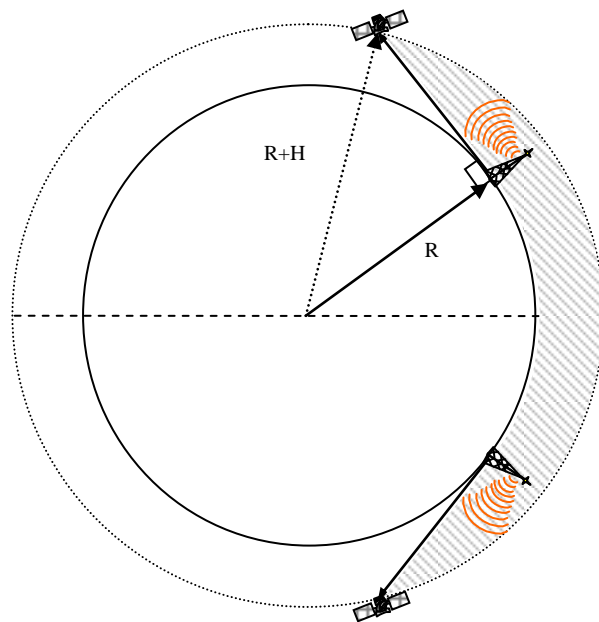
$$\frac{R}{R+H} = \cos \left( \left( \frac{2\pi}{5063 \left( \frac{R+H}{R} \right)^{3/2} - \frac{2\pi}{86400}} \right) t \right) \dots (4.29)$$

$$\cos^{-1} \frac{R}{R+H} = \left( \frac{2\pi}{5063 \left( \frac{R+H}{R} \right)^{3/2} - \frac{2\pi}{86400}} \right) t \dots (4.30)$$

Por lo tanto:

$$t = \frac{\cos^{-1} \frac{R}{R+H}}{2\pi} \frac{2\pi}{5063 \left( \frac{R+H}{R} \right)^{3/2} - \frac{2\pi}{86400}} \dots (4.31)$$

La ecuación anterior nos permite determinar el tiempo de cobertura para una órbita circular; la representación gráfica se puede apreciar más claramente en la figura 4.4.



**Figura 4.4** Representación del área de cobertura para una órbita circular.

En el caso de interés los parámetros R y H toman los siguientes valores:

$$R = 6378 \text{ [km]}$$

$$H = 800 \text{ [km]}$$

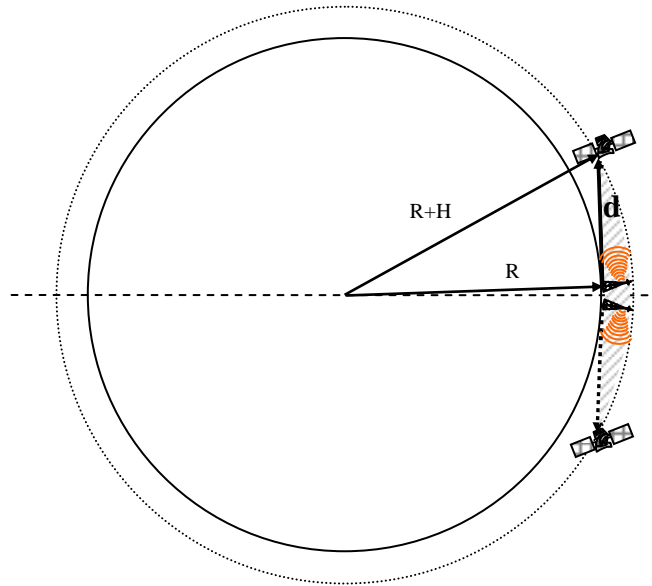
Sustituyendo estos datos en la ecuación 4.31 se obtiene el siguiente valor:

$$t = 493.0414517 \text{ [s]}$$

el cual corresponde al tiempo de cobertura entre el punto de referencia mostrado en la figura 4.4 con una línea punteada y la posición del satélite cuando se cumple la igualdad de la ecuación 4.25, por lo tanto debido a la asimetría de la superficie es posible decir que el tiempo total de cobertura para la órbita circular es:

$$-493.0414517 \leq t \leq 493.0414517$$

Con el tiempo de cobertura calculado la figura 4.4 se modifica para dar lugar a la representación real del área de cobertura para una órbita circular la cual se muestra en la figura 4.5.



**Figura 4.5** Área real de cobertura para una órbita circular.

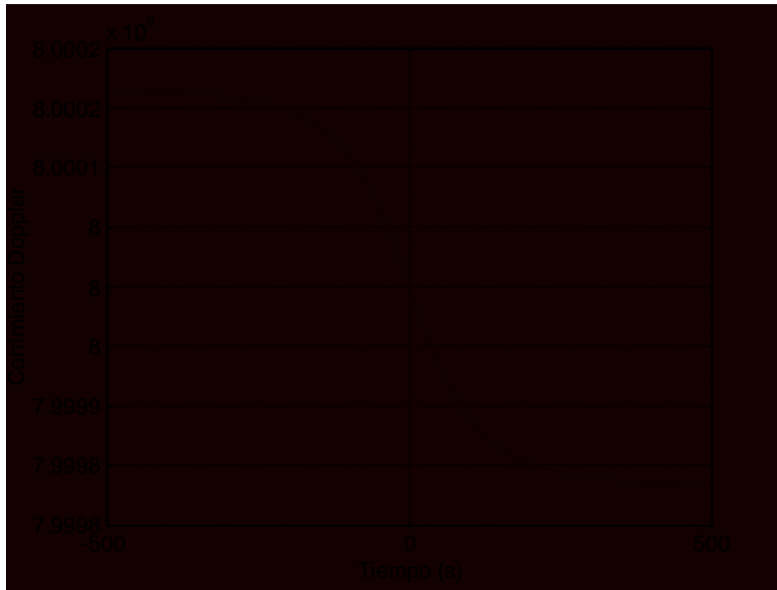
Con la finalidad de obtener los resultados del corrimiento Doppler para el tiempo de cobertura calculado, para ello se elaboro un programa en el lenguaje MATLAB el cual permite realizar cálculos complejos como el aquí requerido, para ello se empleo la ecuación 4.23 y el tiempo de cobertura calculado, con el fin de tener el valor de la velocidad relativa entre satélite y estación terrena, la cual se considerará como la velocidad del observador empleada en las ecuaciones 4.1 y 4.2. Posteriormente cada uno de estos datos se sustituirán en las expresiones 4.1 y 4.2 en donde:

$$f_c = 800 \text{ [MHz]}$$

y

$$c = 300000 \text{ [Km]}$$

para así obtener los resultados correspondientes al corrimiento Doppler, los resultados proporcionados se muestra en el apéndice A1 y el comportamiento grafico se muestra en la figura 4.6:

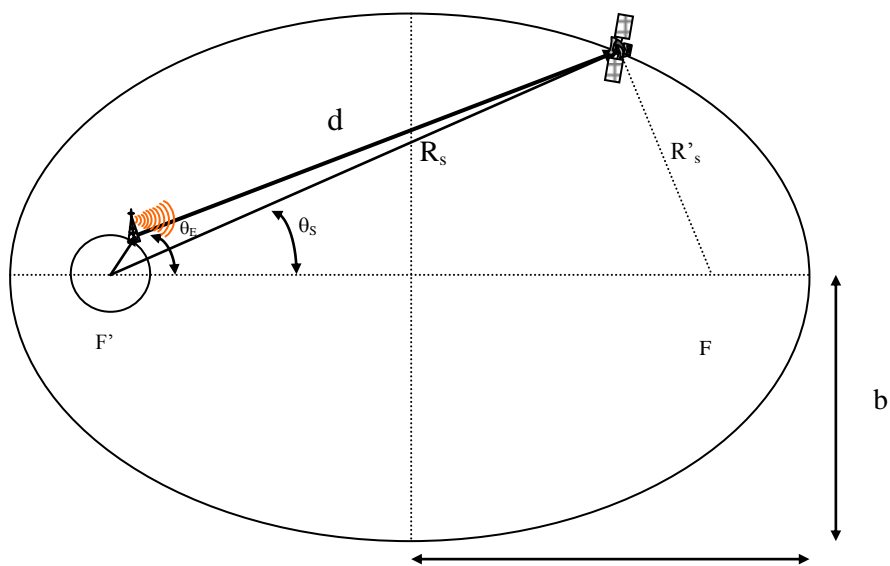


**Figura 4.6** Corrimiento Doppler en una órbita circular ecuatorial.

**Caso 2**

- **Órbita elíptica en un plano ecuatorial**

En este segundo caso el análisis es similar al anterior, para ello es necesario referirse a la figura 4.7, cabe mencionar que la matemática empleada es un poco mas elaborada.



**Figura 4.7.** Parámetros de una órbita elíptica ecuatorial.

Como primer punto se determinará la ecuación polar de una elipse con polo en un foco, para lo cual es necesario hacer uso de una propiedad básica de la elipse que expresa:

$$R_s + R'_s = 2a \quad \dots (4.32)$$

Despejando  $R_s$  se tiene:

$$R'_s = 2a - R_s \quad \dots (4.33)$$

elevando al cuadrado la ecuación 4.33:

$$R'^2_s = 4a^2 - 4R_s a + R_s^2 \quad \dots (4.34)$$

empleando el teorema de los cosenos en un triángulo oblicuángulo se tiene:

$$R'^2_s = R_s^2 + \overline{F'F}^2 - 2R_s \overline{F'F} \cos \theta_s \quad \dots (4.35)$$

siendo:

$$\overline{OF} = C \Rightarrow \text{Distancia focal}$$

por lo tanto:

$$\overline{F'F} = 2C \quad \dots (4.36)$$

sustituyendo 4.36 en 4.35 se tiene:

$$R'^2_s = R_s^2 + (2C)^2 - 2R_s (2C) \cos \theta_s \quad \dots (4.37)$$

desarrollando resulta:

$$R'^2_s = R_s^2 + 4C^2 - 4CR_s \cos \theta_s \quad \dots (4.38)$$

Igualando 4.34 con 4.38 se obtiene:

$$4a^2 - 4R_s a + R_s^2 = R_s^2 + 4C^2 - 4CR_s \cos \theta_s \quad \dots (4.39)$$

Simplificando:

$$4a^2 - 4R_s a = 4C^2 - 4CR_s \cos \theta_s \quad \dots (4.40)$$

dividiendo entre cuatro se tiene:

$$a^2 - R_s a = C^2 - CR_s \cos \theta_s \quad \dots (4.41)$$

Agrupando términos semejantes resulta:

$$a^2 - C^2 = R_s a - CR_s \cos \theta_s \quad \dots (4.42)$$

si

$$b^2 = a^2 - C^2 \quad \dots (4.43)$$

donde:

- a: Semieje mayor
- b: Semieje menor
- c: Distancia focal

entonces la expresión 4.42 se convierte en:

$$b^2 = R_s a - CR_s \cos \theta_s \quad \dots (4.44)$$

siendo:

$$e = \frac{C}{a} \Rightarrow C = ea \quad \dots (4.45)$$

por lo tanto sustituyendo la ecuación 4.45 en la 4.44 se tiene:

$$b^2 = R_s a - eaR_s \cos \theta_s \quad \dots (4.46)$$

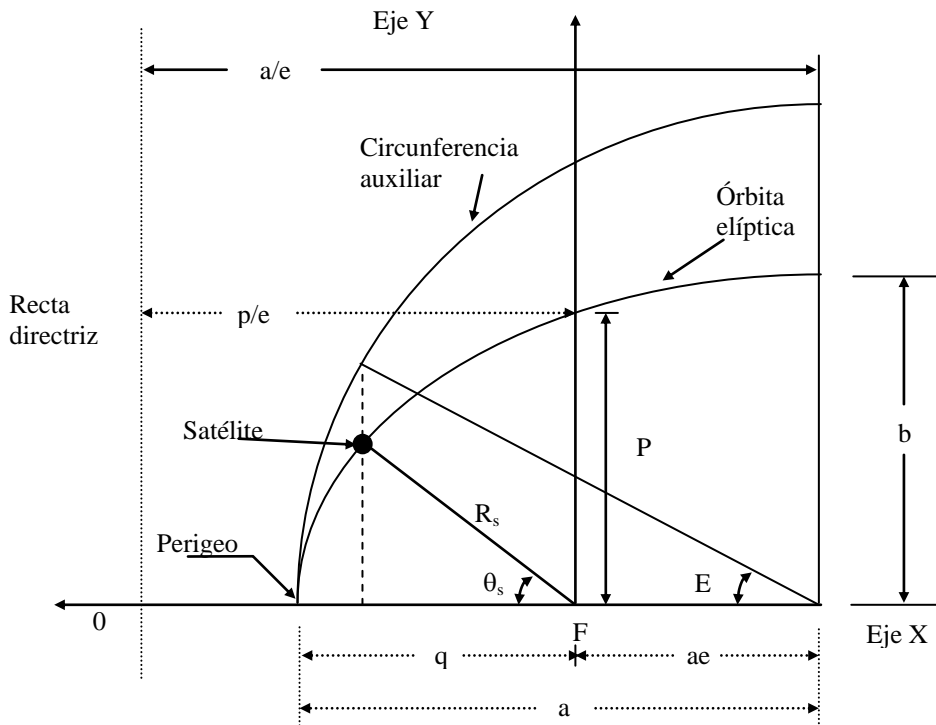
Agrupando términos semejantes resulta:

$$b^2 = R_s a(1 - e \cos \theta_s) \quad \dots (4.47)$$

Despejando  $R_s$  de 4.47 se tiene:

$$R_s = \frac{b^2/a}{1 - e \cos \theta_s} \quad \text{Ecuación polar de la elipse con polo en un foco} \quad \dots (4.48)$$

Una vez obtenida la ecuación anterior es necesario expresarla en función de  $t$ , para lo cual es necesario apoyarse en la figura 4.8:



**Figura 4.8** Circunferencia auxiliar de radio ‘a’ que contiene una órbita elíptica .

Notación empleada en la figura 4.8:

- $R_s$  = Distancia del satélite desde el centro de la Tierra que es el foco primario
- F = Foco
- a = Semieje mayor
- b = Semieje menor
- e = Excentricidad
- E = Anomalía excéntrica definida por un círculo auxiliar de radio ‘a’ teniendo el centro 0 de la elipse como origen
- p = Semilado recto
- q = Distancia de perigeo; punto de la órbita mas cercano al foco F

De acuerdo a la figura anterior se tiene:

$$\cos\theta_s = \frac{\cos E - e}{1 - e \cos E} \quad \dots (4.49)$$

y

$$\text{seno}\theta_s = \frac{\sqrt{1 - e^2} \text{seno} E}{1 - e \cos E} \quad \dots (4.50)$$



El parámetro E puede ser expresado a su vez como:

$$E = M + e \operatorname{sen} M \quad \dots (4.51)$$

y M se puede expresar en términos del parámetro deseado t que es:

$$M = \frac{\sqrt{\mu}}{\left(\frac{a}{6378}\right)^{3/2}} t \quad \dots (4.52)$$

por otro lado se sabe que:

$$T = 5063 \left(\frac{a}{6378}\right)^{3/2} \quad \dots (4.53)$$

si M para un ciclo completo toma el valor de  $2\pi$  entonces la expresión 4.52 sería:

$$2\pi = \frac{\sqrt{\mu}}{\left(\frac{a}{6378}\right)^{3/2}} t \quad \dots (4.54)$$

despejando t de la ecuación 4.54 se tiene:

$$t = \frac{2\pi \left(\frac{a}{6378}\right)^{3/2}}{\sqrt{\mu}} \quad \dots (4.55)$$

haciendo una similitud de la expresión 4.53 con 4.55 se tiene:

$$\frac{2\pi}{\sqrt{\mu}} = 5063 \Rightarrow \sqrt{\mu} = \frac{2\pi}{5063} \quad \dots (4.56)$$

sustituyendo 4.56 en 4.52 resulta:

$$M = \frac{2\pi}{5063 * \left(\frac{a}{6378}\right)^{3/2}} t \quad \dots (4.57)$$

sustituyendo 4.53 en 4.57 resulta:

$$M = \frac{2\pi}{T} t \quad \dots (4.58)$$

sustituyendo 4.58 en 4.51 se tiene:

$$E = \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \left( \frac{2\pi}{T} t \right) \quad \dots (4.59)$$

sustituyendo 4.59 en 4.49 y 4.50 tenemos:

$$\cos \theta_s = \frac{\cos \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \left( \frac{2\pi}{T} t \right) \right) - e}{1 - e \cos \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \left( \frac{2\pi}{T} t \right) \right)} \quad \dots (4.60)$$

$$\operatorname{seno} \theta_s = \frac{\sqrt{1 - e^2} \operatorname{seno} \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \left( \frac{2\pi}{T} t \right) \right)}{1 - e \cos \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \left( \frac{2\pi}{T} t \right) \right)} \quad \dots (4.61)$$

Ahora bien si sustituimos la expresión 4.49 en la 4.48 se tiene:

$$R_s = \frac{b^2/a}{1 - e \left( \frac{\cos E - e}{1 - e \cos E} \right)} \quad \dots (4.62)$$

desarrollando resulta:

$$R_s = \frac{b^2}{a} \left( \frac{1 - e \cos E}{1 - 2e \cos E + e^2} \right) \quad \dots (4.63)$$

Sustituyendo 4.59 en 4.63 se tiene:

$$R_s = \frac{b^2}{a} \left( \frac{1 - e \cos \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \left( \frac{2\pi}{T} t \right) \right)}{1 - 2e \cos \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \left( \frac{2\pi}{T} t \right) \right) + e^2} \right) \quad \text{Ecuación polar de la elipse en función de 't'} \quad \dots (4.64)$$

Para obtener el valor de la distancia 'd' representada en la figura 4.7 se recurre a la expresión para determinar la distancia entre dos puntos, dichos puntos son los siguientes:

Coordenadas cartesianas de la estación terrena:

$$X_t = R \cos \theta_t \quad \dots (4.65)$$

$$Y_t = R \operatorname{seno} \theta_t \quad \dots (4.66)$$

Coordenadas cartesianas del satélite:

$$X_s = R_s \cos \theta_s \quad \dots (4.67)$$

$$Y_s = R_s \operatorname{seno} \theta_s \quad \dots (4.68)$$

de donde la expresión para determinar la distancia deseada queda dada por:

$$d = \sqrt{(X_s - X_t)^2 + (Y_s - Y_t)^2} \quad \dots (4.69)$$

sustituyendo 4.65, 4.66, 4.67 y 4.68 en 4.69 se tiene:

$$d = \sqrt{(R_s \cos \theta_s - R \cos \theta_t)^2 + (R_s \operatorname{seno} \theta_s - R \operatorname{seno} \theta_t)^2} \quad \dots (4.70)$$

desarrollando los cuadrados y simplificando se tiene:

$$d = \sqrt{R_s^2 - 2RR_s (\cos \theta_s \cos \theta_t + \operatorname{seno} \theta_s \operatorname{seno} \theta_t) + R^2} \quad \dots (4.71)$$

sustituyendo 4.60, 4.61 y 4.64 en 4.71 y simplificando resulta:

$$d = \sqrt{\left( \frac{b^2 \left( 1 - e \cos \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \frac{2\pi}{T} t \right) \right)}{1 - 2e \cos \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \frac{2\pi}{T} t \right) + e^2} \right)^2 - \frac{2Rb^2}{a} \left( \frac{\cos \theta_t \left( \cos \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \frac{2\pi}{T} t \right) - e \right) + \sqrt{1 - e^2} \operatorname{seno} \theta_t \operatorname{seno} \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \frac{2\pi}{T} t \right)}{1 - 2e \cos \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \frac{2\pi}{T} t \right) + e^2} \right) + R^2} \quad \dots (4.72)$$

considerando

$$\theta_t = \frac{2\pi}{86400} t \quad \dots (4.73)$$

para obtener la expresión de la velocidad derivamos 4.72 con respecto a 't' y se tiene:

$$A = 2 \left( \frac{b^2 \left( 1 - e \cos \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \frac{2\pi}{T} t \right) \right)}{1 - 2e \cos \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \frac{2\pi}{T} t \right) + e^2} \right) \left( \frac{eb^2 \left( \frac{2\pi}{T} + \frac{2\pi e}{T} \cos \frac{2\pi}{T} t \right) \operatorname{seno} \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \frac{2\pi}{T} t \right) \left[ \left( 1 - 2e \cos \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \frac{2\pi}{T} t \right) + e^2 \right) - 2 \left( 1 - e \cos \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \frac{2\pi}{T} t \right) \right) \right]}{\left[ 1 - 2e \cos \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \frac{2\pi}{T} t \right) + e^2 \right]^2} \right)$$

$$B = \left[ \cos \theta_t \operatorname{seno} \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \frac{2\pi}{T} t \right) \left( w \sqrt{1 - e^2} - \frac{2\pi e}{T} \cos \frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi}{T} \right) \right] + \left[ \operatorname{seno} \theta_t \cos \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \frac{2\pi}{T} t \right) \left( \frac{2\pi \sqrt{1 - e^2}}{T} - w + w e \operatorname{seno} \theta_t + \frac{2\pi e \sqrt{1 - e^2}}{T} \cos \frac{2\pi}{T} t \right) \right]$$

$$C = 1 - 2e \cos \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \frac{2\pi}{T} t \right) + e^2$$

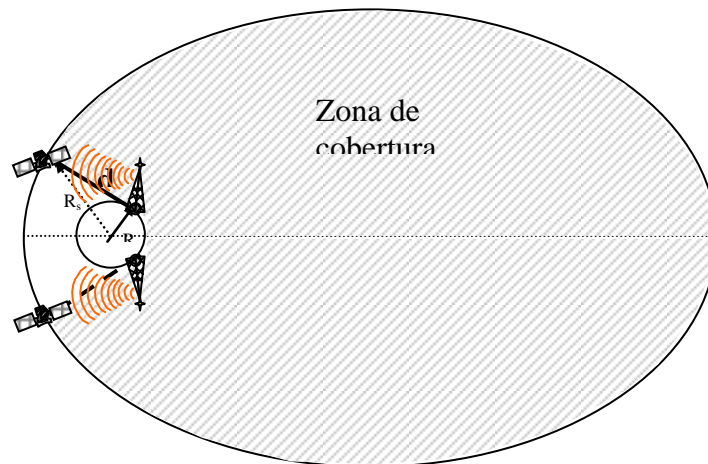
$$D = \left( \cos \theta_t \left( \cos \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \frac{2\pi}{T} t \right) - e \right) + \sqrt{1 - e^2} \operatorname{seno} \theta_t \operatorname{seno} \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \frac{2\pi}{T} t \right) \right) \left( 2e \operatorname{seno} \left( \frac{2\pi}{T} t + e \operatorname{seno} \frac{2\pi}{T} t \right) \left( \frac{2\pi}{T} + \frac{2\pi e}{T} \cos \frac{2\pi}{T} t \right) \right)$$

$$Q = \frac{2Rb^2}{a} \left( \frac{(B * C) - D}{\left[ 1 - 2e \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + e \operatorname{seno} \frac{2\pi}{T}t\right) + e^2 \right]^2} \right)$$

$$V_d = \frac{A - Q}{2d} \text{ Ecuación de la velocidad del satélite con respecto a la estación } \dots (4.74)$$

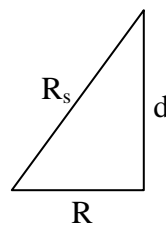
terrena.

Para determinar el tiempo de cobertura es necesario considerar que la distancia “d” y la distancia “R” deben formar un ángulo recto ver figura 4.9.



**Figura 4.10** Representación del área de cobertura para una órbita elíptica.

Tomando como referencia la figura 4.11 el teorema de Pitágoras se emplea de la siguiente forma:



**Figura 4.11** Uso del teorema de Pitágoras para determinar el tiempo de cobertura.

Por Pitágoras se tiene:

$$R_s^2 = d^2 + R^2 \dots (4.75)$$

Para determinar el tiempo de cobertura es necesario igualar a cero la ecuación anterior con lo cual se tiene:

$$R_s - d^2 - R^2 = 0 \quad \dots (4.76)$$

El tiempo de cobertura queda determinado cuando la ecuación anterior se cumple; para lo cual es necesario elaborar un programa en el lenguaje MATLAB que permita determinar el momento en el cual la condición buscada se cumple, para lo cual se emplearon las ecuaciones 4.63 y 4.72; así mismo los valores que tomarán los parámetros a utilizar en estas ecuaciones serán:

$$\begin{aligned} R &= 6378 \text{ [Km]} \\ a &= 26555.341 \text{ [Km]} \\ b &= 18368.883 \text{ [Km]} \\ e &= 0.722164987 \text{ [adm]} \end{aligned}$$

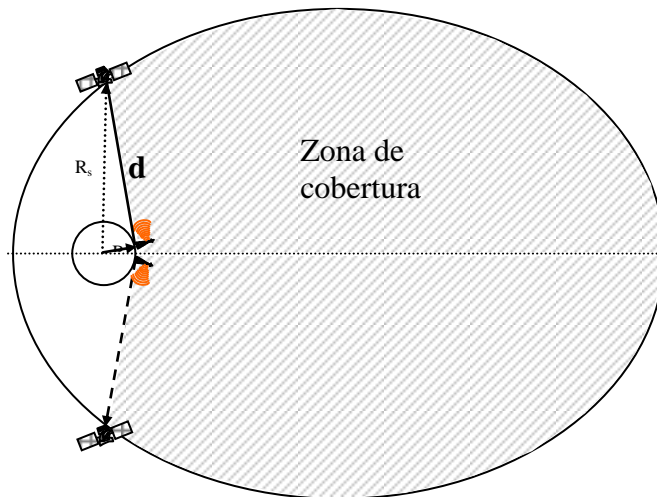
Los resultados de los cálculos realizados de la ecuación 4.76 se muestran en el apéndice A3. Con los resultados obtenidos se observa que el caso más favorable para el tiempo de cobertura de una órbita elíptica corresponde a:

$$t = 2428.27145099999 \text{ [s]}$$

éste dato corresponde al tiempo de cobertura entre el punto de referencia mostrado en la figura 4.10 con una línea punteada y la posición del satélite cuando se cumple la igualdad de la ecuación 4.76, por lo tanto debido a la asimetría de la superficie es posible decir que el tiempo total de cobertura para la órbita elíptica es:

$$-2428.27145099999 \leq t \leq 2428.27145099999$$

Con el tiempo de cobertura calculado la figura 4.10 se modifica para dar lugar a la representación real del área de cobertura para una órbita elíptica la cual se muestra en la figura 4.12.



**Figura 4.12** Área real de cobertura para una órbita elíptica.

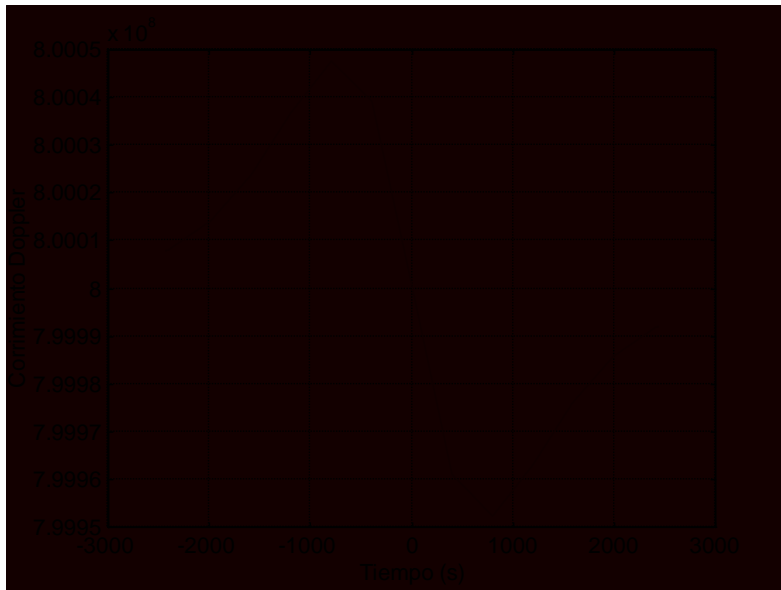
Para obtener los resultados del corrimiento Doppler empleando el tiempo de cobertura calculado, se procedió a elaborar otro programa en MATLAB el cual determinara e valor del corrimiento Doppler en cada instante del tiempo de cobertura, para lo cual es necesario iniciar sustituyendo el tiempo de cobertura en la ecuación 4.74 con el fin de tener el valor de la velocidad del satélite con respecto a la estación terrena, la cual se considerará como la velocidad del observador empleada en las ecuaciones 4.1 y 4.2. Posteriormente cada uno de estos datos se sustituirán en las expresiones 4.1 y 4.2 en donde:

$$\begin{aligned}f_c &= 800 \text{ [MHz]} \\a &= 26555.341 \text{ [Km]} \\b &= 18368.883 \text{ [Km]} \\e &= 0.722164987 \text{ [adm]} \\R &= 6378 \text{ [Km]}\end{aligned}$$

y

$$c = 300000 \text{ [Km]}$$

para así obtener los resultados correspondientes al corrimiento Doppler, los resultados obtenidos se muestra en el apéndice A4. Así mismo los resultados obtenidos son graficados y mostrados en la figura 4.13:

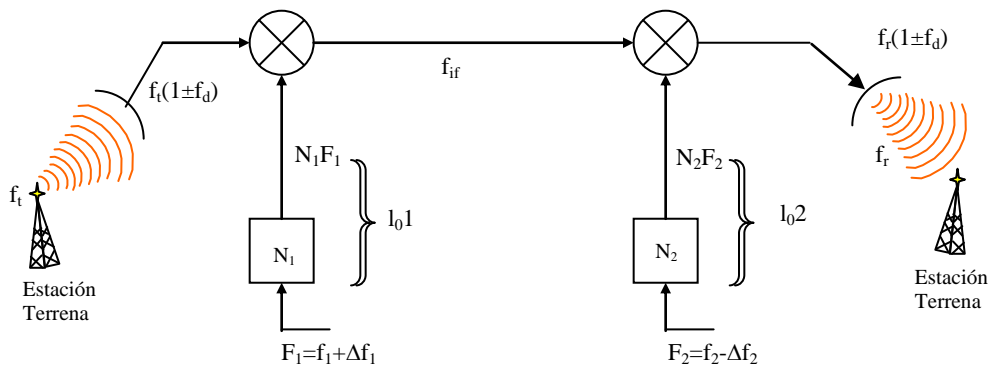


**Figura 4.13** Corrimiento Doppler en una órbita elíptica ecuatorial.

### ***LA SOLUCIÓN***

Con objeto de garantizar una operación satisfactoria de los sistemas de comunicación personal inalámbricos, resulta indispensable modificar las frecuencias intermedias así como los osciladores locales con el fin de cancelar el corrimiento Doppler. La figura 4.13 muestra una situación típica de un enlace de comunicación personal inalámbrica. Los osciladores

locales de los convertidores de recepción y transmisión son ajustados para compensar el efecto Doppler.



**Figura 4.13** Concepto de corrección Doppler a bordo de satélites de comunicación.

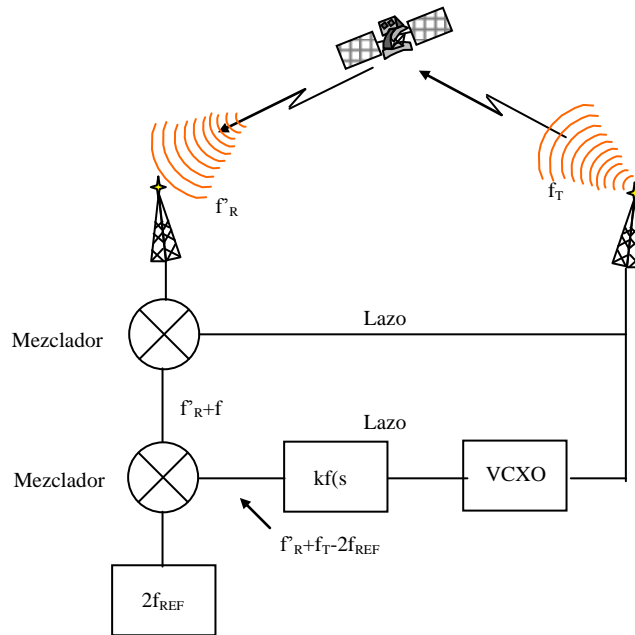
El ajuste del primer oscilador asegura una casi constante frecuencia intermedia. Controlando el oscilador local del convertidor de transmisión la estación terrena receptora no requiere corrección, y el equipo terrestre es simplificado, resultando una reducción de costos.

Los osciladores pueden ser controlados por una función frecuencia-tiempo pre-programada o por un sistema de control de lazo cerrado entre el teléfono y la estación terrena. La configuración de lazo cerrado, sin embargo, podría ser también de interés y es descrita abajo completamente. Se debe enfatizar que la corrección en el teléfono es únicamente válida para el área de cobertura y por eso el error Doppler se incrementa a medida que el usuario se mueve del centro de esta área. A continuación se presentan algunos esquemas que corresponden a ciertos dispositivos de compensación para la presencia del corrimiento Doppler.

## **DISPOSITIVOS DE COMPENSACIÓN**

### **Configuración de lazo cerrado**

El concepto de lazo cerrado está ilustrado en la figura 4.14, con lo cual una frecuencia portadora  $f_T$  de la estación terrena recibida como  $f_R$  para el usuario en movimiento, es regresada a la estación terrena y es recibida por esta como  $f_R'$ . Para cerrar el lazo entre  $f_T$  y  $f_R'$  usando una referencia maestra  $f_{REF}$  es posible hacerla  $f_R$  en el teléfono móvil. En esencia el sistema opera como sigue:



**Figura 4.14** Corrección Doppler de lazo cerrado.

Debido a que:

$$f_R = [1 - (v/c)]f_T \quad \dots (4.77)$$

y

$$f'_R = [1 - (v/c)]f_R \quad \dots (4.78)$$

considerando que  $v \ll c$

$$f_R = \left(1 - 2\frac{v}{c}\right)f_T \quad \dots (4.79)$$

De este modo, para pequeños valores de  $v/c$ , el desplazamiento de frecuencia de la señal recibida en el teléfono será aproximadamente la mitad del desplazamiento de frecuencia de la señal regresada a la estación terrena. El sistema de control obliga a que se cumpla la condición

$$f'_R + f_T = 2f_{REF} \quad \dots (4.80)$$

y así:

$$f_R = f_{REF} \quad \dots (4.81)$$



Esta aproximación, la cual necesita un doble proceso de mezcla, efectivamente transfiere la frecuencia de la estación terrena  $f_{REF}$ , libre del desplazamiento Doppler, al teléfono. Si se asume ahora que  $f_{REF}$  llega a ser una portadora con modulación, entonces siempre y cuando el ancho de banda de la información de banda sea moderado (para evitar desplazamientos Doppler diferentes en los extremos de la de banda) el ancho de banda de la información de la estación terrena estará presente en la frecuencia intermedia sin desplazamiento Doppler. La portadora de recepción  $f_R'$  sigue teniendo un desplazamiento Doppler, pero la información para compensarlo está disponible como un error en el lazo 2. Claramente los papeles de la estación terrena y el teléfono pueden ser invertidos.

### ***Configuración de lazo abierto***

En esta aproximación, la corrección Doppler requerida a lo largo del perímetro de una celda es conocida anticipadamente y es aplicada dentro del teléfono.

La generación y la distribución de la información para la corrección Doppler dentro de un teléfono celular puede ser aproximada en varias formas:

- (a) La síntesis de todas las radio frecuencias puede ser realizada centralmente y distribuido a los apropiados mezcladores locales.
- (b) Se pueden generar centralmente señales digitales o analógicas que incorporen las requeridas correcciones Doppler para cada oscilador local.
- (c) Una única señal ya sea analógica o digital, puede ser globalmente distribuida para todos los osciladores locales.

En los dos últimos casos cada oscilador debe operar en forma tal que se pueda aplicar la corrección fraccional de frecuencia apropiada  $\delta f/f$ .

Ejemplos de señales analógicas que pueden ser distribuidas incluyen una referencia variable para la cual varios osciladores locales están amarrados, o una señal de pulso cuya duración se hace que varíe en proporción al factor Doppler  $a = \pm v/c$ . La distribución digital incluye la codificación del factor Doppler  $a$  dentro de una palabra codificada de  $n$  bits los cuales representan uno de los  $\pm 2^{n-1}$  pasos de corrección. Esto introduce un error de cuantización  $a_{max}/2^{n-1}$ .

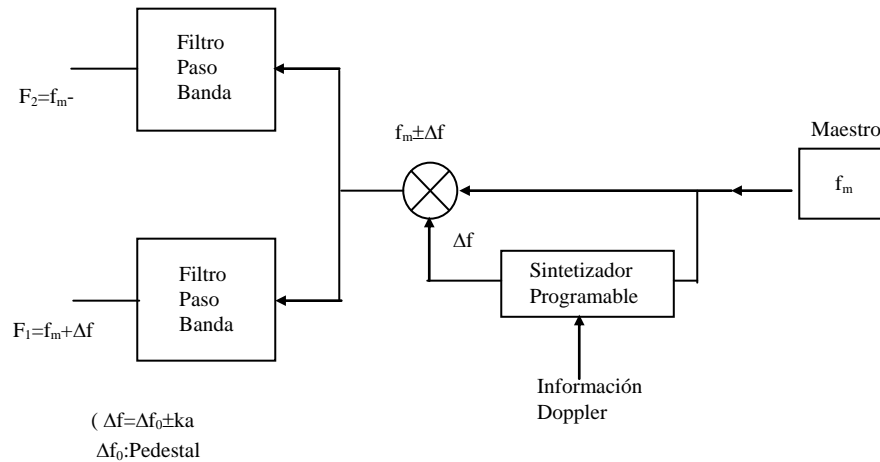
Finalmente, en una configuración de lazo abierto, durante los intervalos de tiempo entre sucesivas correcciones Doppler del oscilador local, los osciladores pueden ser amarrados en fase a la señal correctora o pueden correr libremente. Así, se puede considerar control de frecuencia o control de frecuencia/fase. Ambas aproximaciones han sido investigadas e implementadas en Portsmouth y son llamados sistemas de corrección Doppler “amarre de frecuencia maestra / esclava” y “amarre de fase”.

### ***Sintetizador maestro***

Esta aproximación es conceptualmente muy simple, aunque carece de flexibilidad si en la última etapa del desarrollo se requieren frecuencias adicionales. Esta tiene la ventaja de que

la distribución de la señal RF dentro del celular es menos propensa a interferencia por compatibilidad electromagnética que una banda base o una señal digital.

Una configuración compacta particularmente interesante la cual satisface tanto los requerimientos de transmisión como los de recepción de la figura 4.13 se ilustra en la figura 4.15.



**Figura 4.15** Distribución Doppler doble banda lateral.

El factor de corrección Doppler  $a = \pm v/c$ , con su signo algebraico asociado, se aplica tanto a la conversión de transmisión como a la de recepción. Modulando una portadora apropiada  $f_m$  de un oscilador maestro con una frecuencia  $\Delta f$  cuyo valor codifica a la corrección Doppler, las dos bandas laterales  $F_1 = f_m + \Delta f$  y  $F_2 = f_m - \Delta f$  seguidas por los factores de multiplicación apropiados  $N_1$  y  $N_2$  vienen a ser las oscilaciones locales Doppler de corrección Doppler  $f_{l01}$  y  $f_{l02}$ . Siempre existe una configuración válida en el sentido que dadas unas frecuencias nominales de transmisión y recepción  $f_t$  y  $f_r$  junto con una frecuencia intermedia  $f_{if}$ , se puede encontrar un valor para  $f_m$  y para  $\Delta f_0$ .

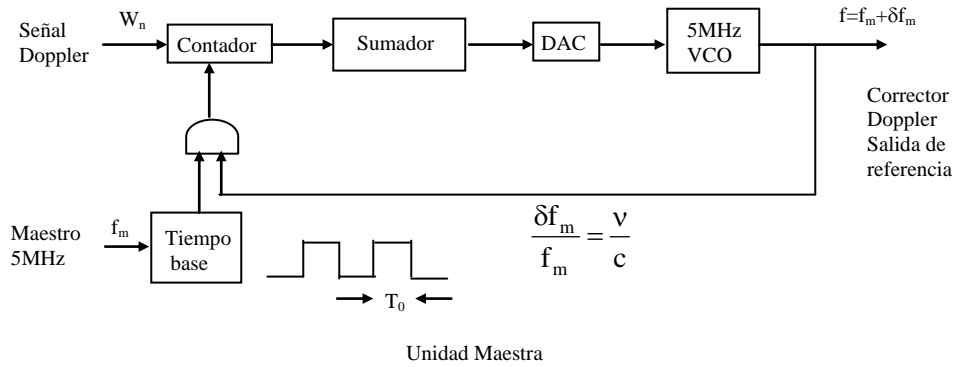
Para la corrección Doppler de una señal de gran ancho de banda, las frecuencias de los extremos de la banda pueden ser sometidas a diferentes desplazamientos Doppler que la portadora (que está en el centro de la banda), y se requiere una corrección más compleja.

### ***Corrección Doppler maestro/esclavo de cierre de frecuencia***

En esta aproximación una señal VHF es generada por un oscilador maestro. El periodo, y por tanto la frecuencia de esta señal es ajustada para incorporar la información de corrección Doppler requerida. Dentro de cada oscilador esclavo esta información Doppler puede ser restaurada y empleada como se requiera. Una ventaja de esta aproximación es que sólo es necesario distribuir una única frecuencia común para cada oscilador esclavo aún cuando la frecuencia nominal de cada esclavo pudiera ser diferente.

- *Diseño de la unidad del oscilador maestro*

El desplazamiento fraccional Doppler requerido  $\delta f/f$  es obtenido empleando el sistema mostrado en la figura 4.16.



**Figura 4.16** Corrección Doppler Frecuencia de cierre Maestro/Esclavo.

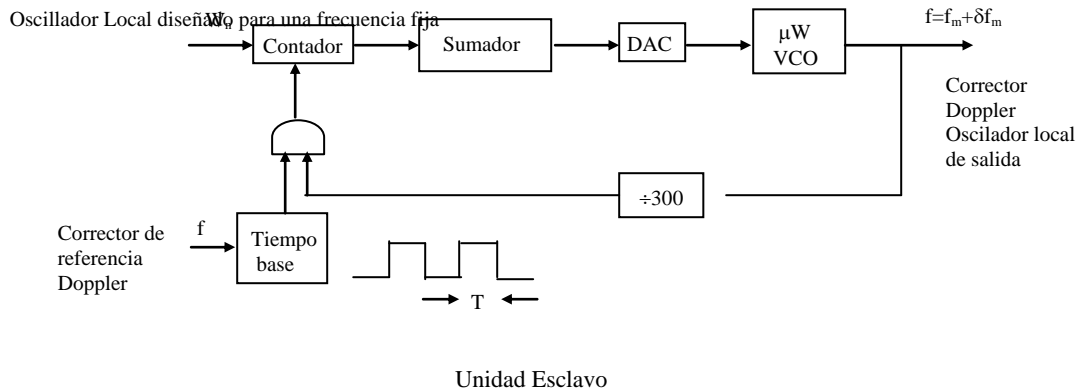
La unidad es manejada por una referencia altamente estable  $f_m$  la cual es alimentada a un divisor para obtener el periodo  $T_0$  durante este tiempo  $T_0$  la frecuencia del VCO es determinada y al final del periodo comparado con la frecuencia de entrada requerida vía la entrada digital registrada del contador  $w(n)$  algún error entre la frecuencia medida y la requerida es usado para corregir el VCO usando un convertidor digital-analógico como se muestra. Esta corrección de frecuencia sólo toma lugar cada  $2T_0$  y por tanto el VCO corre normalmente libre. Por lo tanto es esencial que este oscilador deba tener buena estabilidad a corto plazo. La resolución de la frecuencia  $f_{rs}$  y el rango de retención  $f_{rg}$  del sistema de control están dados por:

$$f_{rs} = \frac{1}{T_0} \quad \text{y} \quad f_{rg} = 2^{N_c} f_{rs} \quad \dots (4.82)$$

en donde  $N_c$  es el número de bits del contador binario. Uno debe notar que el número limitado de bits  $N_c$  causa un desbordamiento al contador  $f_m$  por que  $T_0 \gg 2N_c$ . Esto resulta en “modos” de operación, la frecuencia central de cada modo sería dada por:  $f_0 + n f_{rg}$  ( $n = \pm 1, 2, 3, \dots$ ). la existencia de los modos puede ser usada con ventaja para ampliar el rango de frecuencia de operación del sistema de control. Esto da flexibilidad en la selección del rango de frecuencia de operación del VCO alterando el punto de frecuencia central en el que no hay corrección Doppler. Se debe ser cuidadoso para evitar “saltar” a un modo alto o bajo durante el proceso de corrección; esto es conseguido operando la frecuencia central del modo. Si la ganancia del lazo del sistema es colocada correctamente entonces todos los errores son corregidos dentro de un periodo de medición.

- *Diseño de la unidad del oscilador esclavo*

La estructura de la unidad esclava es muy similar a la del maestro, como puede verse en la figura 4.17.



**Figura 4.17** Corrección Doppler Frecuencia de cierre Maestro/Esclavo.

La entrada del contador, sin embargo, es ahora controlada por la señal contenedora de la información Doppler y el presente contador es usado para determinar la salida de frecuencia de oscilación local.

Cada oscilador local del teléfono debe constar de un oscilador SAW ‘hecho a la medida’ para la frecuencia nominal en donde el desplazamiento Doppler es cero. La salida del oscilador SAW es dividida debajo de un valor cercano de la frecuencia de referencia y controla el contador preestablecido. El sistema opera en tal forma que en la siguiente cuenta se hace una corrección exacta. La frecuencia final de microonda es exacta dentro de  $\pm 1$  bit.

## CAPÍTULO 5

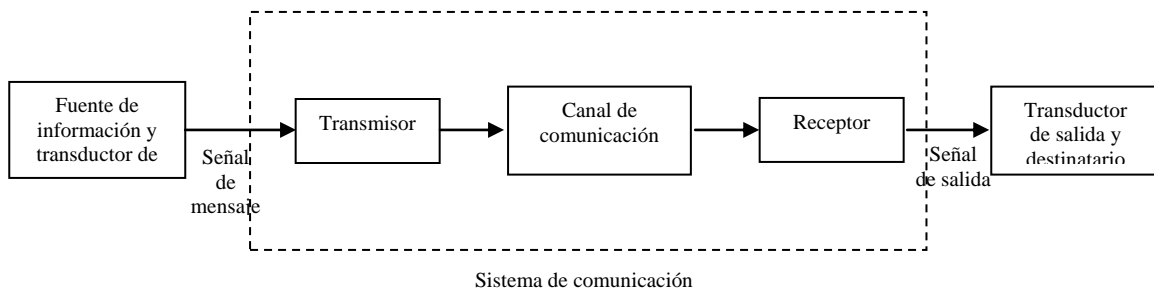
### ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN

De acuerdo al capítulo anterior se observa que existen diversos dispositivos mediante los cuales es posible compensar la presencia del corrimiento Doppler en los sistemas de comunicación persona inalámbrica. Por ello, a continuación se tomará uno de esos dispositivos como prototipo a seguir para elaborar la propuesta de un sistema que sea capaz de eliminar el corrimiento Doppler; una vez que dicho sistema se tenga se procederá a realizar el análisis matemático pertinente que determine la eficacia del mismo ante el problema de interés.

#### *MODELO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN*

El propósito de un sistema de comunicación personal inalámbrico es transmitir señales portadoras de información que procedan de una fuente, localizada en un punto del espacio, con destino a un usuario que se localiza en otro punto. Como regla, el mensaje que produce la fuente no es de naturaleza eléctrica. Conforme a esto, se utiliza un transductor de entrada para que convierta el mensaje que genera la fuente en una señal eléctrica variable en el tiempo que se denomina señal de mensaje. Al utilizar otro transductor en el receptor, el mensaje original se reconstruye en el extremo del usuario.

La figura 5.1 muestra el diagrama de bloques de un sistema de comunicación.



**Figura 5.1** Modelo de un sistema de comunicación.

El sistema consta de tres partes principales:

- 1) Transmisor
- 2) Canal de comunicación
- 3) Receptor

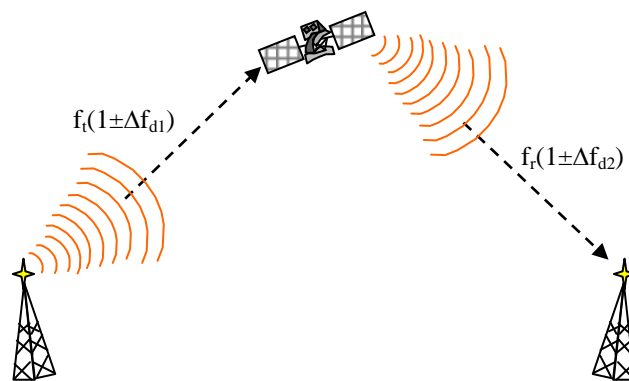
El propósito principal del transmisor es modificar la señal de mensaje en una forma adecuada para su transmisión por el canal. Esta modificación se realiza por medio de un proceso que se conoce como modulación, que comprende la variación de algún parámetro de una onda portadora; por ejemplo: la amplitud, frecuencia o fase de una onda senoidal; en concordancia con la señal de mensaje.

El canal de comunicación puede ser una línea de transmisión o sencillamente un espacio libre en el cual la señal se radía en forma de onda electromagnética. Al propagarse a través del canal, la señal transmitida se distorsiona por las no linealidades y / o las imperfecciones en la respuesta de frecuencia del canal.

El propósito principal del receptor es reconstruir la señal de mensaje original de la versión degradada de la señal transmitida después de su propagación a través del canal. Esta reconstrucción se lleva a efecto mediante el uso de un proceso que se conoce como demodulación, que es el proceso inverso de la modulación; que se define como el proceso por medio del cual se varía alguna característica de una señal portadora de acuerdo con una onda moduladora también denominada señal de banda base; que se usa en el transmisor.

### ***PROPUESTA DE UN SISTEMA CAPAZ DE ELIMINAR EL CORRIMIENTO DOPPLER***

Como se observa en la figura 5.2 es posible detectar la presencia del efecto Doppler tanto en una transmisión como en una recepción; por ello, resulta extremadamente necesario diseñar un dispositivo capaz de garantizar una operación satisfactoria en cualquier tipo de comunicación personal inalámbrica.



**Figura 5.2** Transmisión usuario – satélite.

Para lograr que los sistemas de comunicación personal inalámbricos no se vean afectados por el corrimiento Doppler, el dispositivo que se desarrollará en esta propuesta estará basado en la configuración de lazo abierto, el cual corresponde a uno de los dispositivos de compensación propuestos en el capítulo 4.

Como se observa en la figura 5.2 la señal portadora de información que proporciona la estación terrestre al satélite se ve afectada por la presencia del corrimiento Doppler en la etapa correspondiente al canal de comunicación, esto de acuerdo a la figura 5.1. Por otro lado se considerará que la señal portadora de información se encuentra modulada en amplitud como la etapa del transmisor lo requiere.

La modulación en amplitud (AM) se define como un proceso en el que la amplitud de la onda portadora se hace variar con respecto a un valor medio en forma lineal con la señal de banda base.

Con el objetivo de mostrar más claramente los resultados obtenidos en la elaboración del sistema que se propone se utilizará el lenguaje de programación MATLAB, el cual permite solucionar problemas de cualquier área de aplicación que se ocupe de complejos cálculos numéricos proporcionando al usuario tanto resultados numéricos como resultados gráficos; por esta razón todas las señales de interés en este capítulo se encontrarán desarrolladas en este programa.

Como primer paso se considerará una onda portadora senoidal  $c(t)$  que será definida por:

$$c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) \quad \dots (5.1)$$

donde:

$A_c$  : Amplitud de la portadora (5 [vpp])  
 $f_c$  : Frecuencia de la portadora (10 [GHz])

En el apéndice A7 se encuentra la simulación que muestra forma de la señal portadora  $c(t)$ .

Por otro lado se debe contar con una señal de banda base  $m(t)$  que será la encargada de conducir la especificación del mensaje y será definida como:

$$m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t) \quad \dots (5.2)$$

donde:

$A_m$  : Amplitud de la señal de banda base (5 [vpp])  
 $f_m$  : Frecuencia de la señal de banda base (800 [MHz])

En el apéndice A7 se encuentra la simulación que muestra forma de la señal de banda base  $m(t)$ .

Por lo tanto una onda modulada en amplitud (AM) puede describirse como una función del tiempo, en la forma:

$$s(t) = A_c [1 + k_a m(t)] \cos(2\pi f_c t) \quad \dots (5.3)$$

donde:

$k_a$  : Constante llamada sensibilidad de la amplitud del modulador.  
 $A_c$  : Amplitud de la portadora  
 $f_c$  : Frecuencia de la portadora

Por definición:

$$k_a = \frac{1}{A_c} \quad \dots (5.4)$$

Sustituyendo la ecuación (5.4) en la ecuación (5.3) se tiene:

$$s(t) = A_c \left[ 1 + \frac{m(t)}{A_c} \right] \cos(2\pi f_c t) \quad \dots (5.5)$$

Sustituyendo la ecuación (5.2) en la ecuación (5.5) se tiene:

$$s(t) = A_c \left[ 1 + \frac{A_m \cos(2\pi f_m t)}{A_c} \right] \cos(2\pi f_c t) \quad \dots (5.6)$$

La ecuación (5.6) representa la señal de interés modulada en amplitud y en el apéndice A7 se encuentra la simulación que muestra forma de esta señal  $s(t)$ .

Por otro lado, si:

$$\mu = \frac{A_m}{A_c} \quad \dots (5.7)$$

donde:

$\mu$  : Factor de modulación

al sustituir la ecuación (5.7) en la ecuación (5.6) se obtiene:

$$s(t) = A_c [1 + \mu \cos(2\pi f_m t)] \cos(2\pi f_c t) \quad \dots (5.8)$$

La ecuación (5.8) es la ecuación de la señal de mensaje original enviada de la estación terrena al satélite, sin embargo como se mencionó anteriormente, esta señal se ve afectada por el corrimiento Doppler debido al movimiento del satélite, dicha señal al propagarse por el espacio llega al satélite con su modulación original y la producida por el corrimiento Doppler, provocando con esto que la señal se modifique de la siguiente manera:

$$s(t) = A_c [1 + \mu \cos(2\pi [f_m + f_d] t)] \cos(2\pi (f_c + f_d) t) \quad \dots (5.9)$$

donde:

$A_c$  : Amplitud de la portadora  
 $\mu$  : Factor de modulación  
 $f_m$  : Frecuencia de la señal de banda base  
 $f_c$  : Frecuencia de la portadora  
 $f_d$  : Frecuencia Doppler



Por lo tanto con base en la ecuación (5.9) es posible decir que una señal que se encuentra afectada por el corrimiento Doppler es similar a una onda que se encuentra modulada en frecuencia la cual se modifica en el instante en el que el satélite se acerca o se aleja de la estación terrena.

Esto se puede observar más claramente en el apéndice A8 en donde se realiza una comparación entre la señal modulada en amplitud original y la señal afectada por el corrimiento Doppler en el instante en que el satélite se aleja y se acerca de la estación terrena.

De la misma manera que en los casos anteriores en el apéndice A9 se encuentra la simulación de la señal de interés, pero ahora afectada por el corrimiento Doppler en forma general.

Como lo que se pretende es eliminar el corrimiento Doppler, resulta entonces necesario que en el receptor exista algún dispositivo capaz de modificar la frecuencia de la señal recibida a una frecuencia conocida, la cual se denominará  $f_i$  y será generada por un oscilador que se denominará oscilador maestro.

Como primer paso, una vez que la señal fue recibida por el satélite, resulta necesario que éste reconstruya la señal de mensaje original, esta reconstrucción se lleva a efecto mediante el uso de la demodulación, que es el proceso inverso de la modulación que se usa en el transmisor.

Para llevar a cabo el proceso de demodulación se procederá a utilizar la técnica del detector de ley cuadrada dado por la siguiente expresión:

$$s_2(t) = a_1 s(t) + a_2 s^2(t) \quad \dots (5.10)$$

Por definición se tiene que:

$$a_1 = 1 \quad \dots (5.11)$$

y

$$a_2 = \frac{1}{2A_c} \quad \dots (5.12)$$

en donde:

$a_1$  : constante

$a_2$  : constante

$s(t)$  : señal modulada en AM y afectada por el corrimiento Doppler

Sustituyendo la ecuación (5.9) en la ecuación (5.10) se tiene:

$$s_2(t) = a_1 A_c [1 + \mu \cos(2\pi[f_m + f_d]t)] \cos(2\pi[f_c + f_d]t) + a_2 A_c^2 [1 + \mu \cos(2\pi[f_m + f_d]t)]^2 \cos^2(2\pi[f_c + f_d]t) \dots (5.13)$$

proponiendo la identidad trigonométrica expresada como:

$$\cos^2 \alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2} \dots (5.14)$$

desarrollando los cuadrados de la ecuación (5.13) y sustituyendo en está la ecuación (5.14) se tiene:

$$s_2(t) = a_1 A_c [1 + \mu \cos(2\pi[f_m + f_d]t)] \cos(2\pi[f_c + f_d]t) + a_2 A_c^2 [1 + 2\mu \cos(2\pi[f_m + f_d]t) + \mu^2 \cos^2(2\pi[f_m + f_d]t)] \left( \frac{1 + \cos(4\pi[f_c + f_d]t)}{2} \right) \dots (5.15)$$

Desarrollando se tiene:

$$s_2(t) = a_1 A_c \cos(2\pi[f_m + f_d]t) + a_1 A_c \mu \cos(2\pi[f_m + f_d]t) \cos(2\pi[f_c + f_d]t) + \frac{a_2 A_c^2}{2} + \frac{a_2 A_c^2}{2} \cos(4\pi[f_c + f_d]t) + a_2 A_c^2 \mu \cos(2\pi[f_m + f_d]t) + a_2 A_c^2 \mu \cos(2\pi[f_m + f_d]t) \cos(4\pi[f_c + f_d]t) + \frac{a_2 A_c^2 \mu^2}{2} \cos^2(2\pi[f_m + f_d]t) + a_2 A_c^2 \mu^2 \cos^2(2\pi[f_m + f_d]t) \cos(4\pi[f_c + f_d]t) \dots (5.16)$$

La señal deseada es:

$$a_2 A_c^2 \mu \cos(2\pi[f_m + f_d]t) \dots (5.17)$$

y se debe al término  $a_2 s^2(t)$  de aquí la descripción de “detector de ley cuadrada”; este término puede extraerse de la ecuación (5.16) empleando un filtro paso bajas, sin embargo, ésta no es la única contribución dentro del espectro de banda base, ya que el término:

$$\frac{1}{2} a_2 A_c^2 \mu^2 \cos^2(2\pi[f_m + f_d]t) \dots (5.18)$$

da lugar a una pluralidad de componentes similares de frecuencia. La relación entre las señales deseables y la distorsión es igual a  $2/\mu \cos(2\pi[f_m + f_d]t)$ . Para hacer grande esta relación es necesario limitar el porcentaje de modulación, es decir, se escoge

$|\mu \cos(2\pi[f_m + f_d]t)|$  pequeño en comparación con la unidad para toda  $t$ . Haciendo esto la expresión para la señal demodulada es:

$$s_2(t) = a_2 A_c^2 \mu \cos(2\pi[f_m + f_d]t) \quad \dots (5.19)$$

sustituyendo la ecuación (5.7) y la ecuación (5.12) en la ecuación (5.19) se tiene:

$$s_2(t) = \frac{A_m}{2} \cos(2\pi[f_m + f_d]t) \quad \dots (5.20)$$

De acuerdo a la ecuación (5.20) se observa que se presenta una atenuación del 50% en la amplitud de la señal, por lo cual es indispensable agregar una etapa de ganancia a la salida del bloque encargado de la demodulación con el cual la ecuación (5.20) será:

$$s_2(t) = A_m \cos(2\pi[f_m + f_d]t) \quad \dots (5.21)$$

En el apéndice A10 se encuentra la simulación que muestra la forma de esta señal  $s_2(t)$  antes y después de pasar por la etapa de ganancia.

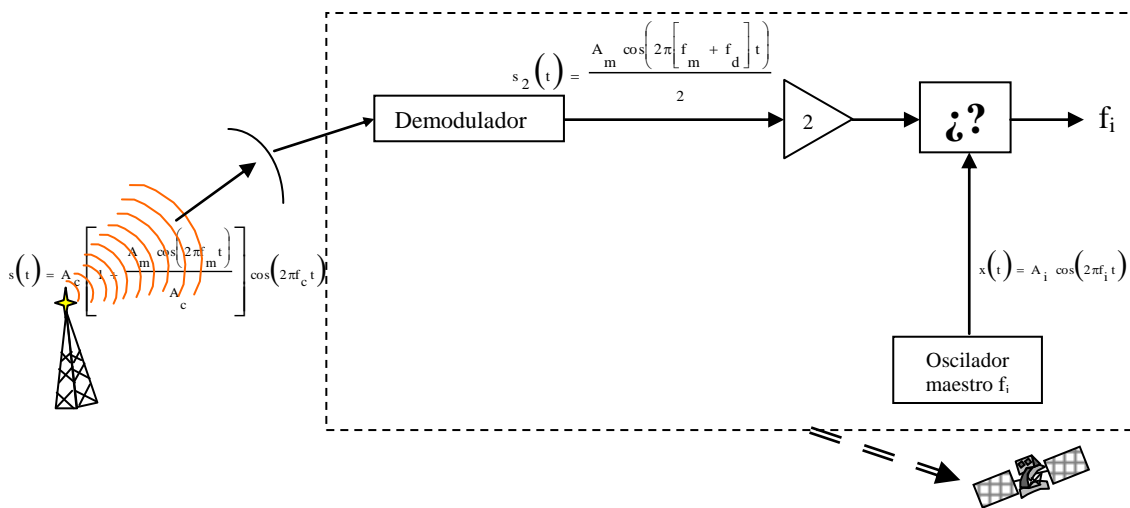
La ecuación que representará a la señal del oscilador maestro estará dada por:

$$x(t) = A_i \cos(2\pi f_i t) \quad \dots (5.22)$$

donde:

- $A_i$  : Amplitud de la señal maestra (5 [vpp])
- $f_i$  : Frecuencia del oscilador maestro (850 [MHz])

En forma esquemática la figura 5.3 muestra el comportamiento de la señal y muestra un panorama general de como se pretende corregir el corrimiento Doppler:



**Figura 5.3** Esquema de las etapas a seguir para corregir el corrimiento Doppler .

De acuerdo a lo que se observa en la figura 5.3 la señal de banda base  $s_2(t)$  obtenida a la salida del demodulador se debe modificar en frecuencia de tal forma que se obtenga la misma señal de banda base solo que a una frecuencia diferente; que para fines prácticos de denominar  $f_i$  y será generada por el oscilador maestro; por lo tanto analizando exclusivamente lo que pasa con las frecuencias se tiene:

Si la frecuencia de la señal de banda base  $s_2(t)$  se encuentra dada por:

$$f_m + f_d \quad \dots (5.23)$$

y la frecuencia a la cual se desea modificar dicha señal es:

$$f_i \quad \dots (5.24)$$

por lo tanto se tiene:

$$f_m + f_d + X = f_i \quad \dots (5.25)$$

despejando X de la ecuación (5.25) se tiene:

$$X = f_i - f_m - f_d \quad \dots (5.26)$$

sustituyendo la ecuación (5.26) en la ecuación (5.25) se tiene:

$$f_m + f_d + f_i - f_m - f_d = f_i \quad \dots (5.27)$$

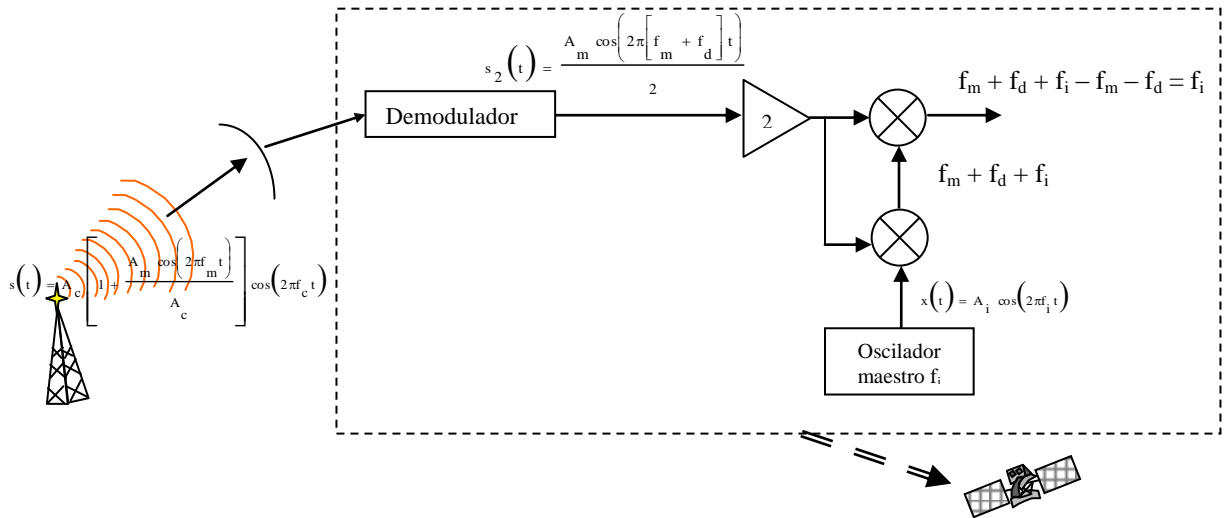
Con lo cual se observa que es necesario contar con dos etapas de multiplicación, una que proporcione la suma de:

$$f_m + f_d + f_i \quad \dots (5.28)$$

y posteriormente otra que genere la resta de:

$$f_m + f_d + f_i - f_m - f_d = f_i \quad \dots (5.29)$$

por lo tanto la figura 5.3 se modifica como se muestra en la figura 5.4, la cual describe el resultado al cual se desea llegar; sin embargo para lograr esto, es necesario realizar el análisis matemático pertinente con el objetivo de observar cual es el comportamiento general de las señales de interés.



**Figura 5.4** Análisis de las etapas de multiplicación sugeridas.

El análisis partirá del primer bloque de multiplicación ubicado después del oscilador maestro en donde se presenta el producto de  $s_2(t)$  con  $x(t)$  de la siguiente manera:

$$s_2(t) \cdot x(t) = p(t) \quad \dots (5.30)$$

donde:

$p(t)$  : Señal resultante de la primer etapa de multiplicación

Sustituyendo las ecuaciones (5.21) y (5.22) en la ecuación (5.30) se tiene:

$$p(t) = A_m \cos(2\pi[f_m + f_d]t) \cdot A_i \cos(2\pi f_i t) \quad \dots (5.31)$$

Por identidad trigonométrica se tiene:

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) \quad \dots (5.32)$$

empleando la ecuación (5.32) en la ecuación (5.31) se tiene:

$$p(t) = A_m A_i \left( \frac{1}{2} \cos(2\pi[f_m + f_d + f_i]t) + \frac{1}{2} \cos(2\pi[f_m + f_d - f_i]t) \right) \quad \dots (5.33)$$

la ecuación anterior es el resultado del primer producto deseado, en ella se observa claramente el término de la ecuación (5.28) buscado: sin embargo también se presenta otro término el cual es necesario eliminar, para lo cual se empleará un filtro paso bajas el cual se encargará de extraer la siguiente expresión:

$$p(t) = \frac{A_m A_i}{2} \cos(2\pi[f_m + f_d - f_i]t) \quad \dots (5.34)$$

la ecuación (5.34) representa el primer resultado esperado, en el apéndice A11 se encuentra la simulación que muestra el comportamiento de la señal  $p(t)$ .

Ahora se procederá a realizar el segundo producto sugerido en la figura 5.4 el cual será el producto de la ecuación (5.21) con (5.34) expresado como:

$$R_f(t) = s_2(t) \cdot p(t) \quad \dots (5.35)$$

donde:

$R_f$  : Resultado final

$$R_f(t) = A_m \cos(2\pi[f_m + f_d]t) \cdot \frac{A_m A_i}{2} \cos(2\pi[f_m + f_d - f_i]t) \quad \dots (5.36)$$

empleando la ecuación (5.32) en la ecuación (5.36) y desarrollando se tiene:

$$R_f(t) = \frac{A_m^2 A_i}{2} \left[ \frac{1}{2} \cos(2\pi[f_m + f_d + f_m + f_d - f_i]t) + \frac{1}{2} \cos(2\pi[f_m + f_d - f_m - f_d + f_i]t) \right] \quad \dots (5.37)$$

simplificando se tiene:

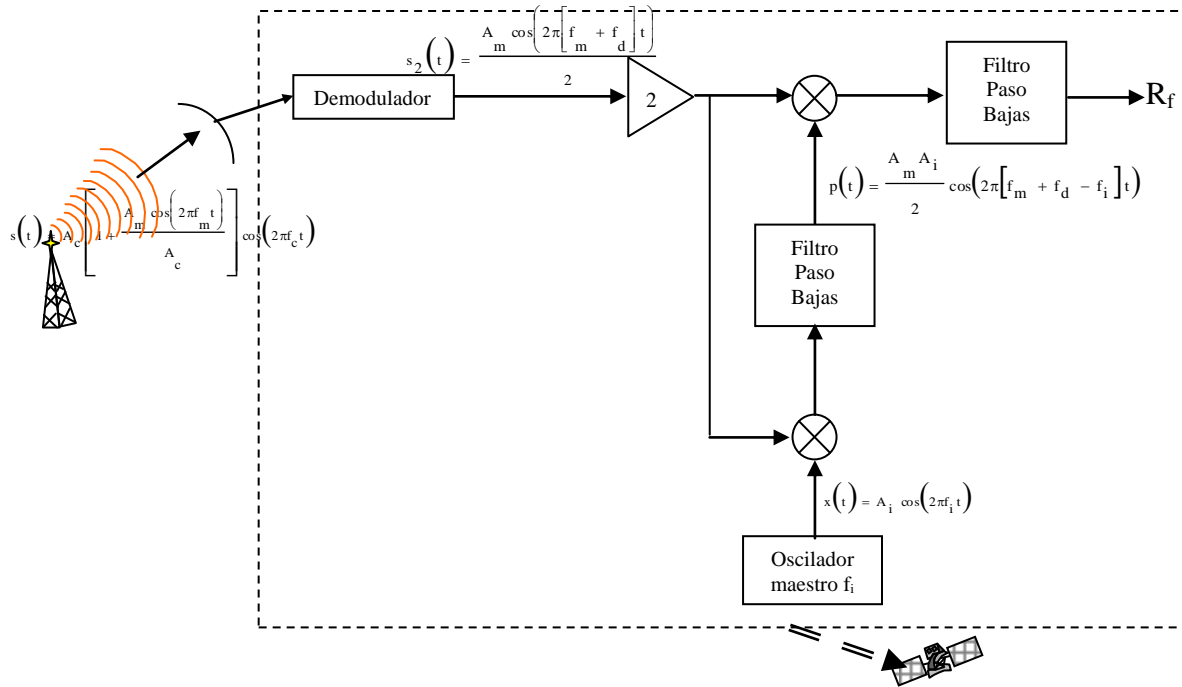
$$R_f(t) = \frac{A_m^2 A_i}{2} \left[ \frac{1}{2} \cos(2\pi[2f_m + 2f_d - f_i]t) + \frac{1}{2} \cos(2\pi f_i t) \right] \quad \dots (5.38)$$

En la ecuación (5.38) se observa el término al que inicialmente se pretendía llegar pero como en el caso anterior también se cuenta con un término indeseable el cual nuevamente se eliminará empleando un filtro paso bajas con el cual se tendrá:

$$R_f(t) = \frac{A_m^2 A_i}{4} \cos(2\pi f_i t) \quad \dots (5.39)$$

con esto se obtiene la expresión esperada de la señal de banda base modificada en frecuencia y cuya simulación se muestra en el apéndice A12.

Debido a la presencia de los filtros paso bajas sugeridos anteriormente los cuales permiten llegar al resultado esperado, la figura 5.4 se debe modificar nuevamente y por tanto la figura 5.5 muestra el esquema de la propuesta final del sistema que puede eliminar la presencia del corrimiento Doppler.



**Figura 5.5** Diagrama de bloques del compensador Doppler.

# APÉNDICE



**CORRIMIENTO DOPPLER EN UNA ÓRBITA CIRCULAR  
ECUATORIAL**

<b>Tiempo</b>	<b>Distancia</b>	<b>Velocidad</b>	<b>frecuencia Doppler</b>
-500	3336.04795	-6.1654994	800016441.7
-493.041452	3293.14439	-6.16563711	800016442
-490	3274.39193	-6.16561031	800016442
-480	3212.7377	-6.16513479	800016440.7
-470	3151.09131	-6.16403793	800016437.8
-460	3089.45914	-6.16228138	800016433.1
-450	3027.84802	-6.15982293	800016426.5
-440	2966.26518	-6.15661604	800016418
-430	2904.71836	-6.15260933	800016407.3
-420	2843.21585	-6.14774595	800016394.3
-410	2781.76651	-6.14196288	800016378.9
-400	2720.37989	-6.13519016	800016360.8
-390	2659.06626	-6.12734994	800016339.9
-380	2597.83673	-6.11835543	800016315.9
-370	2536.70332	-6.10810968	800016288.6
-360	2475.67907	-6.09650417	800016257.7
-350	2414.77818	-6.08341715	800016222.8
-340	2354.01612	-6.06871179	800016183.6
-330	2293.40985	-6.05223387	800016139.6
-320	2232.97793	-6.03380931	800016090.5
-310	2172.7408	-6.01324104	800016035.6
-300	2112.721	-5.99030558	800015974.5
-290	2052.94342	-5.96474882	800015906.3
-280	1993.43572	-5.93628123	800015830.4
-270	1934.2286	-5.90457216	800015745.8
-260	1875.35633	-5.86924317	800015651.6
-250	1816.85724	-5.82986023	800015546.6
-240	1758.7743	-5.78592454	800015429.4
-230	1701.15583	-5.73686184	800015298.6
-220	1644.05635	-5.68200999	800015152.3
-210	1587.53746	-5.62060449	800014988.6
-200	1531.66903	-5.55176203	800014805
-190	1476.5304	-5.47446167	800014598.8
-180	1422.2119	-5.38752404	800014367
-170	1368.81655	-5.28958864	800014105.8
-160	1316.46198	-5.17909037	800013811.1
-150	1265.28257	-5.05423658	800013478.2
-140	1215.43187	-4.91298763	800013101.5
-130	1167.0851	-4.75304499	800012675
-120	1120.44177	-4.57185369	800012191.8
-110	1075.72812	-4.36662843	800011644.5
-100	1033.19915	-4.13441608	800011025.3
-90	993.139792	-3.87221036	800010326
-80	955.864552	-3.57713633	800009539.1
-70	921.714959	-3.24671946	800008658
-60	891.05382	-2.87924508	800007678.1
-50	864.255501	-2.4741931	800006597.9
-40	841.691655	-2.03270144	800005420.6
-30	823.712524	-1.5579717	800004154.6
-20	810.62495	-1.05549901	800002814.7
-10	802.669485	-0.53300507	800001421.3
0	800	0	800000000

<b>Continuación:</b>			
<i>Tiempo</i>	<i>Distancia</i>	<i>Velocidad</i>	<i>frecuencia Doppler</i>
0	800	0	800000000
10	802.669485	0.533005073	799998578.7
20	810.62495	1.055499012	799997185.3
30	823.712524	1.557971701	799995845.4
40	841.691655	2.032701445	799994579.5
50	864.255501	2.474193102	799993402.2
60	891.05382	2.879245077	799992322.1
70	921.714959	3.246719463	799991342.2
80	955.864552	3.577136326	799990461.1
90	993.139792	3.872210361	799989674.2
100	1033.19915	4.134416078	799988975
110	1075.72812	4.366628435	799988355.8
120	1120.44177	4.571853687	799987808.6
130	1167.0851	4.753044986	799987325.4
140	1215.43187	4.912987632	799986898.9
150	1265.28257	5.054236584	799986522.3
160	1316.46198	5.179090366	799986189.3
170	1368.81655	5.28958864	799985894.7
180	1422.2119	5.387524038	799985633.5
190	1476.5304	5.474461675	799985401.7
200	1531.66903	5.551762029	799985195.6
210	1587.53746	5.620604492	799985012
220	1644.05635	5.682009987	799984848.3
230	1701.15583	5.736861844	799984702
240	1758.7743	5.785924539	799984571.2
250	1816.85724	5.829860233	799984454
260	1875.35633	5.869243175	799984349
270	1934.2286	5.904572162	799984254.8
280	1993.43572	5.936281232	799984170.2
290	2052.94342	5.96474882	799984094.3
300	2112.721	5.990305579	799984026.2
310	2172.7408	6.013241043	799983965
320	2232.97793	6.033809306	799983910.2
330	2293.40985	6.052233874	799983861
340	2354.01612	6.068711788	799983817.1
350	2414.77818	6.083417155	799983777.9
360	2475.67907	6.096504166	799983743
370	2536.70332	6.108109678	799983712
380	2597.83673	6.118355429	799983684.7
390	2659.06626	6.127349941	799983660.7
400	2720.37989	6.135190162	799983639.8
410	2781.76651	6.141962881	799983621.8
420	2843.21585	6.147745947	799983606.3
430	2904.71836	6.15260933	799983593.4
440	2966.26518	6.15661604	799983582.7
450	3027.84802	6.159822929	799983574.1
460	3089.45914	6.162281382	799983567.6
470	3151.09131	6.164037933	799983562.9
480	3212.7377	6.16513479	799983560
490	3274.39193	6.16561031	799983558.7
493.041452	3293.14439	6.165637113	799983558.6
500	3336.04795	6.165499403	799983559

**BÚSQUEDA DEL TIEMPO DE COBERTURA PARA  
UNA ÓRBITA ELÍPTICA**

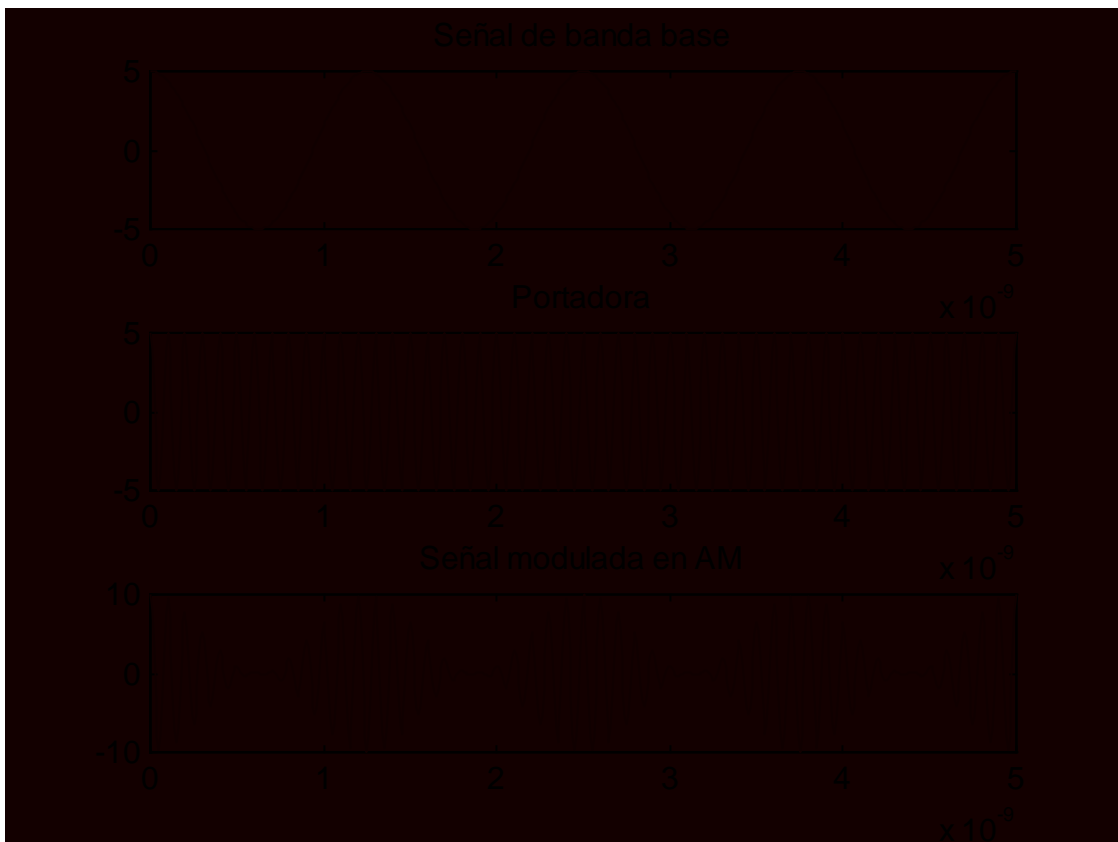
<i>Tiempo</i>	$R_s$	$d^2 + R^2$	$R_s - d^2 - r^2 = 0$
0	2091477881	1589469603	502008279
398.276997	1794028483	1348039054	445989428
796.553993	1226407066	902109671	324297395
1194.83099	773365064	568660791	204704274
1593.10799	496668616	383539455	113129161
1991.38498	338040371	289531422	48508948.6
2389.66198	245552902	241989030	3563871.23
2410	241979241	240307788	1671453.1
2415	241114351	239902967	1211384.26
2420	240254778	239501442	753336.002
2425	239400482	239103184	297298.1
2425.5	239315341	239063537	251804.487
2426	239230253	239023922	206330.866
2426.5	239145217	238984340	160877.227
2427	239060233	238944789	115443.558
2427.5	238975301	238905272	70029.8512
2428	238890422	238865786	24636.0952
2428.05	238881937	238861839	20097.8166
2428.1	238873452	238857893	15559.7373
2428.15	238864968	238853946	11021.8574
2428.2	238856485	238850001	6484.17687
2428.25	238848002	238846055	1946.69573
2428.2505	238847917	238846016	1901.32193
2428.251	238847832	238845976	1855.94814
2428.2515	238847747	238845937	1810.57438
2428.252	238847662	238845897	1765.20063
2428.2525	238847578	238845858	1719.82691
2428.253	238847493	238845818	1674.4532
2428.2535	238847408	238845779	1629.07952
2428.254	238847323	238845739	1583.70585
2428.2545	238847238	238845700	1538.33221
2428.255	238847153	238845661	1492.95858
2428.2555	238847069	238845621	1447.58498
2428.256	238846984	238845582	1402.21139
2428.2565	238846899	238845542	1356.83783
2428.257	238846814	238845503	1311.46428
2428.2575	238846729	238845463	1266.09075
2428.258	238846645	238845424	1220.71725
2428.2585	238846560	238845384	1175.34376
2428.259	238846475	238845345	1129.9703
2428.2595	238846390	238845305	1084.59685
2428.26	238846305	238845266	1039.22343
2428.2605	238846220	238845227	993.85002
2428.261	238846136	238845187	948.476634
2428.2615	238846051	238845148	903.103268
2428.262	238845966	238845108	857.729921
2428.2625	238845881	238845069	812.356595
2428.263	238845796	238845029	766.983289
2428.2635	238845711	238844990	721.610003
2428.264	238845627	238844950	676.236736
2428.2645	238845542	238844911	630.86349
2428.265	238845457	238844871	585.490263
2428.2655	238845372	238844832	540.117057
2428.266	238845287	238844793	494.74387
2428.2665	238845202	238844753	449.370703
2428.267	238845118	238844714	403.997557
2428.2675	238845033	238844674	358.62443
2428.268	238844948	238844635	313.251323
2428.2685	238844863	238844595	267.878236
2428.269	238844778	238844556	222.505169
2428.2695	238844694	238844516	177.132122
2428.27	238844609	238844477	131.759095
2428.2705	238844524	238844438	86.3860873
2428.271	238844439	238844398	41.0131001
2428.27145	238844363	238844362	0.08668348
2428.27195	238844278	238844323	-45.2862658
2787.93898	189233933	217287904	-28053970.9
3186.21597	153239699	203984012	-50744312.8

### CORRIMIENTO DOPPLER PARA UNA ÓRBITA ELÍPTICA

<i>Tiempo</i>	<i>Distancia</i>	<i>Velocidad</i>	<i>frecuencia Doppler</i>
-2428.27195	14077.1247	-2.96296414	800007901.3157
-2428.27145	14077.1261	-2.96296615	800007901.3211
-2428.271	14077.1273	-2.96296796	800007901.3259
-2428.2705	14077.1287	-2.96296997	800007901.3313
-2428.27	14077.1301	-2.96297197	800007901.3366
-2428.2695	14077.1315	-2.96297398	800007901.3420
-2428.269	14077.1329	-2.96297599	800007901.3473
-2428.2685	14077.1343	-2.962978	800007901.3527
-2428.268	14077.1357	-2.96298001	800007901.3581
-2428.2675	14077.1371	-2.96298201	800007901.3634
-2428.267	14077.1385	-2.96298402	800007901.3688
-2428.2665	14077.1399	-2.96298603	800007901.3741
-2428.266	14077.1413	-2.96298804	800007901.3795
-2428.2655	14077.1428	-2.96299005	800007901.3848
-2428.265	14077.1442	-2.96299205	800007901.3902
-2428.2645	14077.1456	-2.96299406	800007901.3955
-2428.264	14077.147	-2.96299607	800007901.4009
-2428.2635	14077.1484	-2.96299808	800007901.4062
-2428.263	14077.1498	-2.96300008	800007901.4116
-2428.2625	14077.1512	-2.96300209	800007901.4170
-2428.262	14077.1526	-2.9630041	800007901.4223
-2428.2615	14077.154	-2.96300611	800007901.4277
-2428.261	14077.1554	-2.96300812	800007901.4330
-2428.2605	14077.1568	-2.96301012	800007901.4384
-2428.26	14077.1582	-2.96301213	800007901.4437
-2428.2595	14077.1596	-2.96301414	800007901.4491
-2428.259	14077.161	-2.96301615	800007901.4544
-2428.2585	14077.1624	-2.96301816	800007901.4598
-2428.258	14077.1638	-2.96302017	800007901.4651
-2428.2575	14077.1652	-2.96302217	800007901.4705
-2428.257	14077.1666	-2.96302418	800007901.4759
-2428.2565	14077.168	-2.96302619	800007901.4812
-2428.256	14077.1694	-2.9630282	800007901.4866
-2428.2555	14077.1708	-2.96303021	800007901.4919
-2428.255	14077.1722	-2.96303221	800007901.4973
-2428.2545	14077.1736	-2.96303422	800007901.5026
-2428.254	14077.175	-2.96303623	800007901.5080
-2428.2535	14077.1764	-2.96303824	800007901.5133
-2428.253	14077.1778	-2.96304025	800007901.5187
-2428.2525	14077.1792	-2.96304225	800007901.5241
-2428.252	14077.1806	-2.96304426	800007901.5294
-2428.2515	14077.182	-2.96304627	800007901.5348
-2428.251	14077.1834	-2.96304828	800007901.5401
-2428.2505	14077.1848	-2.96305029	800007901.5455
-2428.25	14077.1862	-2.96305229	800007901.5508

<b>Continuación:</b>			
<i>Tiempo</i>	<i>Distancia</i>	<i>Velocidad</i>	<i>frecuencia Doppler</i>
-2428.25	14077.1862	-2.96305229	800007901.5508
-2428.2	14077.3263	-2.9632531	800007902.0863
-2428.15	14077.4665	-2.96345393	800007902.6219
-2428.1	14077.6066	-2.96365477	800007903.1575
-2428.05	14077.7468	-2.96385562	800007903.6931
-2428	14077.887	-2.96405649	800007904.2287
-2427.5	14079.2893	-2.96606593	800007909.5874
-2427	14080.6926	-2.96807679	800007914.9498
-2426.5	14082.097	-2.97008907	800007920.3159
-2426	14083.5023	-2.97210276	800007925.6859
-2425.5	14084.9087	-2.97411787	800007931.0596
-2425	14086.3161	-2.9761344	800007936.4371
-2420	14100.4453	-2.99637785	800007990.4207
-2415	14114.6762	-3.01676406	800008044.7851
-2410	14129.0093	-3.03729391	800008099.5324
-2389.66198	14188.3807	-3.12230004	800008326.2201
-1991.38498	15775.0606	-5.3579924	800014288.2349
-1593.10799	18516.4946	-8.95708918	800023886.2843
-1194.83099	22977.8569	-13.836643	800036899.4165
-796.553993	29350.1412	-17.8165852	800047513.7156
-398.276997	36157.4359	-14.6254325	800039003.0547
0	39354.6785	0	800000000.0000
398.276997	36157.4359	14.6254325	799961000.7480
796.553993	29350.1412	17.8165852	799952491.9276
1194.83099	22977.8569	13.836643	799963103.9871
1593.10799	18516.4946	8.95708918	799976115.1420
1991.38498	15775.0606	5.3579924	799985712.2754
2389.66198	14188.3807	3.12230004	799991673.9532
2410	14129.0093	3.03729391	799991900.6316
2415	14114.6762	3.01676406	799991955.3767
2420	14100.4453	2.99637785	799992009.7389
2425	14086.3161	2.9761344	799992063.7203
2425.5	14084.9087	2.97411787	799992069.0976
2426	14083.5023	2.97210276	799992074.4712
2426.5	14082.097	2.97008907	799992079.8409
2427	14080.6926	2.96807679	799992085.2069
2427.5	14079.2893	2.96606593	799992090.5690
2428	14077.887	2.96405649	799992095.9275
2428.05	14077.7468	2.96385562	799992096.4631
2428.1	14077.6066	2.96365477	799992096.9987
2428.15	14077.4665	2.96345393	799992097.5343
2428.2	14077.3263	2.9632531	799992098.0698
2428.25	14077.1862	2.96305229	799992098.6053
2428.2505	14077.1848	2.96305029	799992098.6106
2428.251	14077.1834	2.96304828	799992098.6160
2428.2515	14077.182	2.96304627	799992098.6213
2428.252	14077.1806	2.96304426	799992098.6267
2428.2525	14077.1792	2.96304225	799992098.6320
2428.253	14077.1778	2.96304025	799992098.6374
2428.2535	14077.1764	2.96303824	799992098.6427
2428.254	14077.175	2.96303623	799992098.6481
2428.2545	14077.1736	2.96303422	799992098.6535

<b>Continuación:</b>			
<i>Tiempo</i>	<i>Distancia</i>	<i>Velocidad</i>	<i>frecuencia Doppler</i>
2428.2545	14077.1736	2.96303422	799992098.6535
2428.255	14077.1722	2.96303221	799992098.6588
2428.2555	14077.1708	2.96303021	799992098.6642
2428.256	14077.1694	2.9630282	799992098.6695
2428.2565	14077.168	2.96302619	799992098.6749
2428.257	14077.1666	2.96302418	799992098.6802
2428.2575	14077.1652	2.96302217	799992098.6856
2428.258	14077.1638	2.96302017	799992098.6909
2428.2585	14077.1624	2.96301816	799992098.6963
2428.259	14077.161	2.96301615	799992098.7016
2428.2595	14077.1596	2.96301414	799992098.7070
2428.26	14077.1582	2.96301213	799992098.7124
2428.2605	14077.1568	2.96301012	799992098.7177
2428.261	14077.1554	2.96300812	799992098.7231
2428.2615	14077.154	2.96300611	799992098.7284
2428.262	14077.1526	2.9630041	799992098.7338
2428.2625	14077.1512	2.96300209	799992098.7391
2428.263	14077.1498	2.96300008	799992098.7445
2428.2635	14077.1484	2.96299808	799992098.7498
2428.264	14077.147	2.96299607	799992098.7552
2428.2645	14077.1456	2.96299406	799992098.7605
2428.265	14077.1442	2.96299205	799992098.7659
2428.2655	14077.1428	2.96299005	799992098.7713
2428.266	14077.1413	2.96298804	799992098.7766
2428.2665	14077.1399	2.96298603	799992098.7820
2428.267	14077.1385	2.96298402	799992098.7873
2428.2675	14077.1371	2.96298201	799992098.7927
2428.268	14077.1357	2.96298001	799992098.7980
2428.2685	14077.1343	2.962978	799992098.8034
2428.269	14077.1329	2.96297599	799992098.8087
2428.2695	14077.1315	2.96297398	799992098.8141
2428.27	14077.1301	2.96297197	799992098.8194
2428.2705	14077.1287	2.96296997	799992098.8248
2428.271	14077.1273	2.96296796	799992098.8302
2428.27145	14077.1261	2.96296615	799992098.8350
2428.27195	14077.1247	2.96296414	799992098.8403

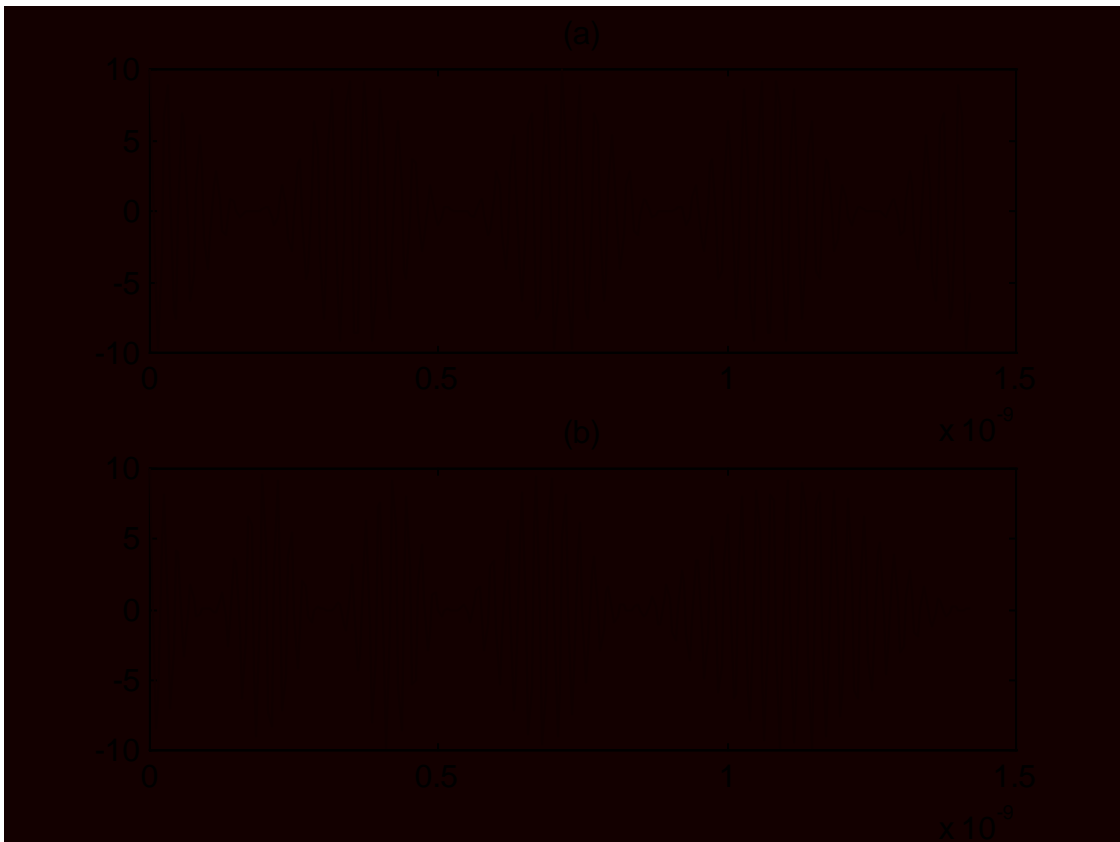


Representación en el dominio del tiempo de una señal AM.



Representación en el dominio del tiempo de una señal AM afectada por el corrimiento Doppler: (a) señal original, (b) señal del satélite acercándose a la estación terrena, (c) señal del satélite alejándose de la estación terrena.

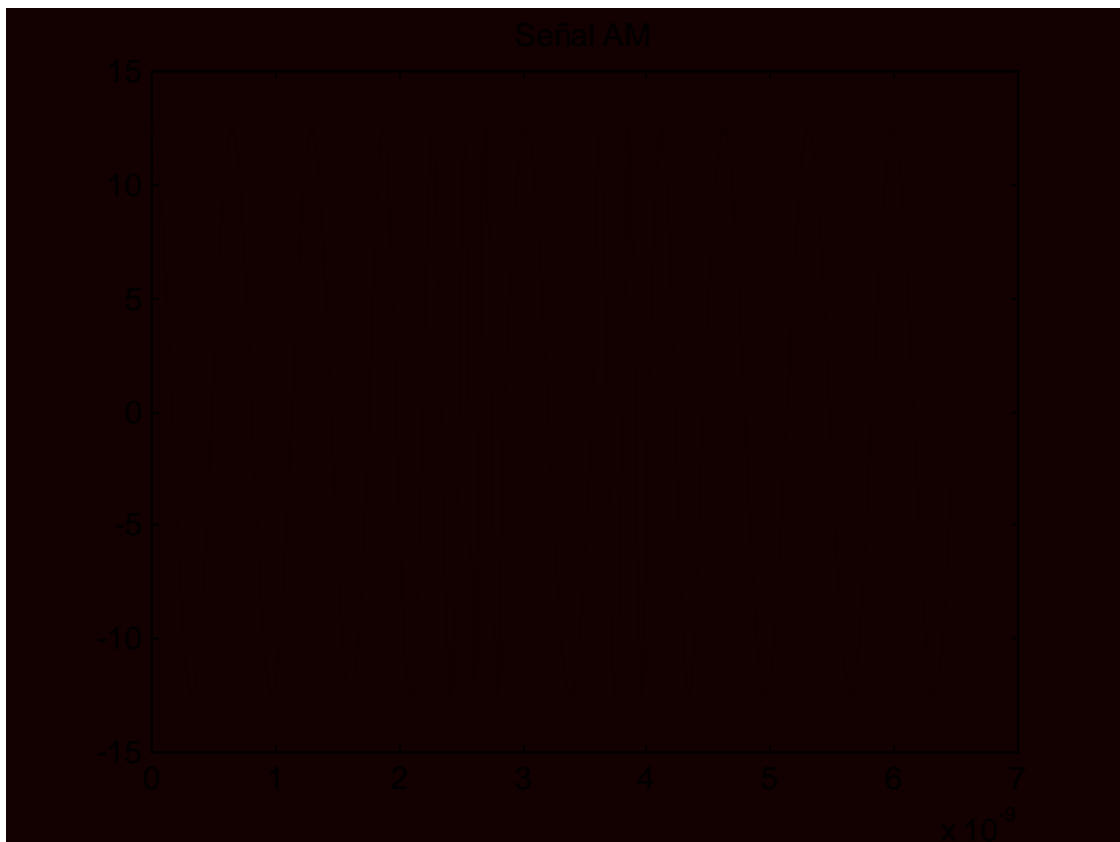




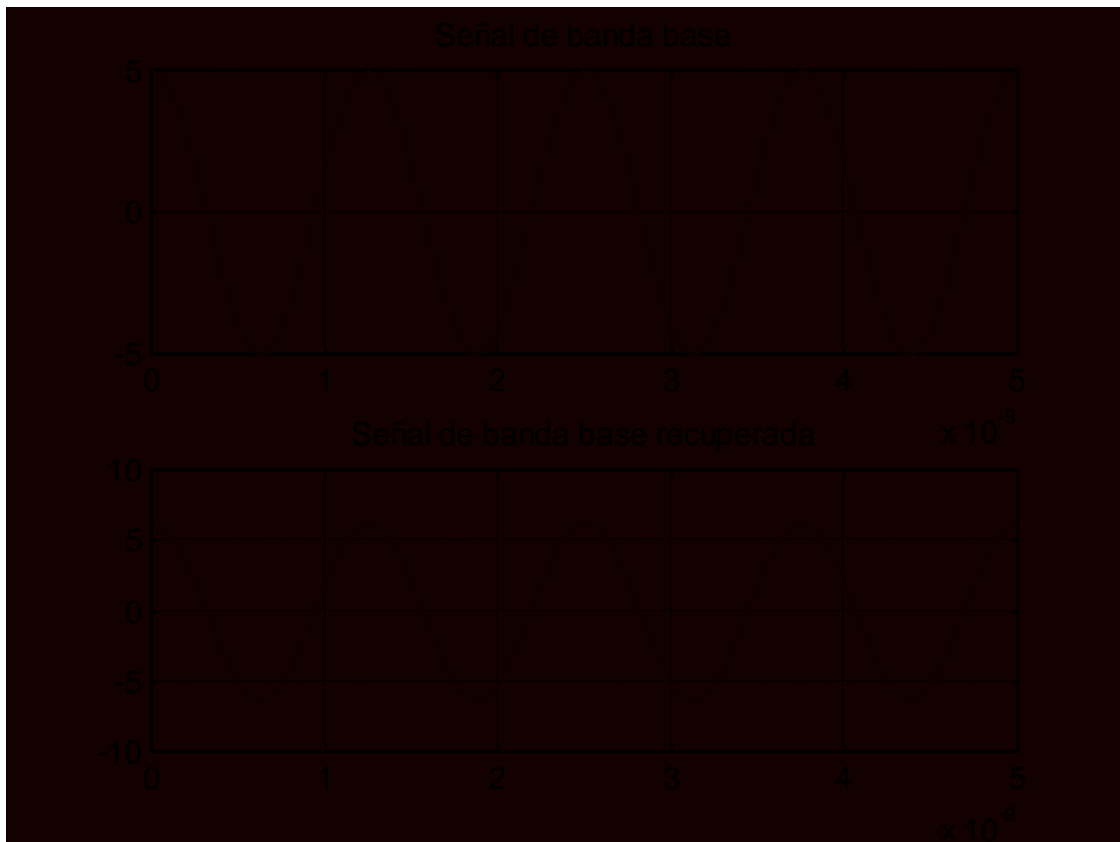
Comparación entre: (a) señal AM original y (b) señal AM afectada por el corrimiento Doppler.



Representación de la señal de banda base (a) antes de la etapa de ganancia, (b) después de la pasar por la etapa de ganancia.



Resultado del primer producto realizado entre la señal demodulada y la señal del oscilador maestro.



Resultado de la señal obtenida al pasar por el dispositivo de compensación propuesto.

## CONCLUSIONES

En la actualidad la investigación en sistemas de comunicaciones personal móvil se encamina al uso de constelaciones de satélites con objeto de proporcionar una cobertura global, que no puede lograrse con las redes celulares terrestres, bien porque no es posible - como en los océanos y en los polos- o porque no es viable -como en zonas despobladas-. Desde el desarrollo de los primeros sistemas de comunicación con satélites se vio que una de las principales ventajas de éstos era la posibilidad de lograr dar cobertura a todo el globo terrestre.

Es por ello que uno de los principales objetivos de los sistemas de comunicación personal inalámbricos es contar con la posibilidad de tener un pequeño teléfono inalámbrico que pueda ser utilizado en cualquier parte del mundo, respondiendo al mismo número de teléfono se esté donde se esté, y ofrezca servicios tanto de voz como de fax, transmisión de datos y otros. En Estados Unidos a este sistema se le llama PCS (personal communication services, servicios de comunicación personal). En el resto del mundo se conoce como PCN (personal communication network, red de comunicaciones personales).

En el desarrollo de esta red de comunicaciones personales se ha visto la posibilidad de usar una constelación de satélites para reforzar la red celular terrestre, de modo que en el momento en que un usuario no pueda acceder a la red terrestre, porque no tenga cobertura o porque no halla canales libres, exista la posibilidad de establecer la comunicación a través de la red de satélites. La principal cuestión a la hora de diseñar esta constelación de satélites es la elección de la órbita adecuada para el objetivo que se busca.

Desafortunadamente la órbita geostacionaria no puede soportar los requerimientos de una futura red de comunicación personal. Como se analiza en el presente trabajo, los satélites en órbita geostacionaria tienen bastantes inconvenientes comparándolos con los de otras órbitas más bajas. Como por ejemplo, las comunicaciones con satélites GEO sufren un retardo en frecuencia denominado corrimiento Doppler debido a la gran distancia a la que están. Este retardo, que es del orden de 32883.4 [Hz] en el caso de una órbita circular y de 15802.6314 [Hz] para una órbita elíptica, en comunicaciones de voz no representa gran problema pero es más grave en el caso de comunicación de datos.

Por esta razón al realizar el presente trabajo todo el desarrollo fue orientado a buscar alguna técnica que fuese capaz de eliminar la presencia del corrimiento Doppler, ya que como se puede observar en los resultados gráficos mostrados en el apéndice, dicho corrimiento parece ser casi imperceptible, sin embargo en una comunicación en donde la información son datos, resulta necesario tomar en cuenta el tipo de modulación y las técnicas de multiplexaje que serán utilizadas, además de que se requiere de un proceso de demodulación altamente coherente para evitar que se pierda gran parte de la información.

Como se puede observar, en el capítulo 5 el diseño propuesto para corregir el fenómeno estudiado únicamente muestra una alternativa para solucionar el problema planteado de una manera clara y sencilla, pero para ello se considero que el resultado proporcionado por el

proceso de demodulación mostrado en el diagrama es el óptimo, ya que a partir de éste es como se procede a realizar la solución a nuestro problema, los resultados extraídos en cada una de las etapas del dispositivo propuesto representan el caso más favorable, en el cual otro tipo de factores que también afectan a las comunicaciones de este tipo tales como el ruido, la interferencia, la lluvia, etc., ya fueron de alguna manera solucionados.

Con los resultados obtenidos se comprueba que la solución planteada en esta tesis ante el problema del corrimiento Doppler en los sistemas de comunicación personal, es viable; sin embargo, es necesario aclarar que la construcción del mismo es más delicada ya que al trabajar con sistemas de alta frecuencia como es el caso, todo dispositivo electrónico requiere de una alta precisión en el instante de la construcción, ya que para construir un dispositivo de este tipo es necesario considerar el grosor en las pistas del circuito, la temperatura a la cual son soldados cada uno de los elementos y sobre todo el costo de cada elemento, los cuales tienen que ser los adecuados para soportar los cambios que se presentan en la puesta en órbita de un satélite.

## BIBLIOGRAFÍA

Mobile Radio Networks  
Networking and protocols  
Bernhard H. Walke  
John Wiley & Sons, Ltd  
Feb 2000

GSM  
Cellular Radio Telephony  
Joachim Tisal  
ESME – Sudria France  
John Wiley & Sons  
Feb 1998

Mobile Communication Satellites  
Tom Logsdon  
Mc Graw – Hill, inc.  
1995

Introduction to Digital Mobile Communication  
Yoshihiko Akaiwa  
John Wiley & Sons, Ltd  
1997

Sistemas de comunicación móvil  
Una introducción  
Domingo Lara R.  
David Muños R.  
Salvador Rosas G.  
Alfaomega  
1992

Mobile Cellular Telecommunications Systems  
William C. Y. Lee  
Mc Grae – Hill Book Company  
1989

Mobile Cellular Telecommunications  
Analog and Digital System  
William C. Y. Lee  
Mc Grae – Hill Book Company  
2ª Edición

Mobile Communication Systems  
J. D. Parsons  
J. G. Gardiner  
Blackie (Glasgow and London)  
Halsted Press, a division of John Wiley & Sons, Linc. New York

GSM and Personal communications Handbook  
Siegmond M. Redl  
Matthias K. Weber  
Malcolm W. Pliphant  
Artech House  
1998

Páginas web consultadas:

[www.neutron.ing.ucv.ve/revista-e/No2](http://www.neutron.ing.ucv.ve/revista-e/No2)  
[www.enterate.UNAM.mx/articulos/agosto/telefccl.htm](http://www.enterate.UNAM.mx/articulos/agosto/telefccl.htm)  
[www.Ciencifisica.com](http://www.Ciencifisica.com)  
[www.revista.UNAM.mx/vol2/num2/art3/](http://www.revista.UNAM.mx/vol2/num2/art3/)  
[www.telecom.fi.UNAM.mx/telefonía/telefonía\\_Celular.htm](http://www.telecom.fi.UNAM.mx/telefonía/telefonía_Celular.htm)