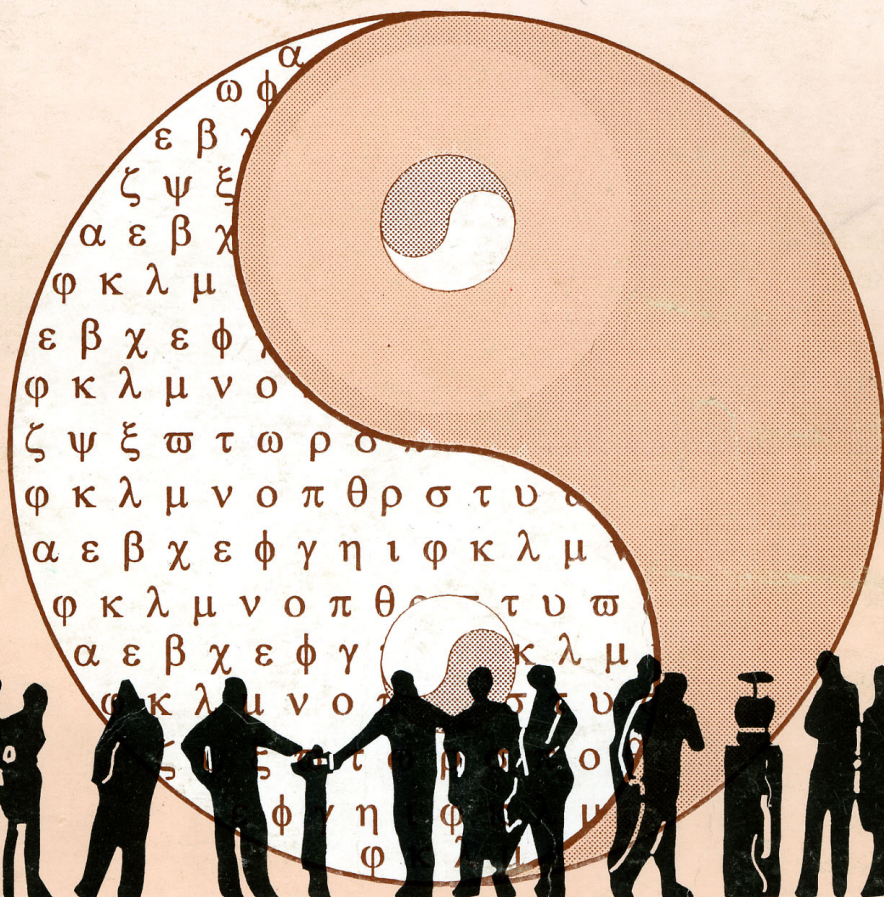


620
IN

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
JULIO/DICIEMBRE 1992 VOLUMEN 2 Nº 2



INGENIERIA

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica

Volumen 2 Julio-Diciembre 1992 Número 2

DIRECTOR

Rodolfo Herrera J.

EDITOR

Victor Herrera C.

CONSEJO EDITORIAL

Víctor Hugo Chacón P.

Ismael Mazón G.

Domingo Riggioni C.

CORRESPONDENCIA Y SUSCRIPCIONES

Editorial de la Universidad de Costa Rica

Apartado Postal 75

2060 Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

CANJES

Universidad de Costa Rica

Sistemas de Bibliotecas, Documentación e información

Unidad de Selección y Adquisiciones-CANJE

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

Suscripción anual:

Costa Rica: ₡750,00

Otros países: US \$20.00

Número suelto:

Costa Rica: ₡500,00

Otros países: US \$10.00



TELEFONIA CELULAR: UN SISTEMA AVANZADO DE COMUNICACION PERSONAL

*Bach. Arturo Ramírez Porras**

RESUMEN

Se presenta una descripción general de un sistema estándar de Telefonía Celular desde el punto de vista de su operación y conceptualización teórica. Asimismo, se repasan algunos de los inconvenientes surgidos en su implementación así como sus posibles soluciones.

SUMMARY

A general description about a standard Cellular System is presented based upon its operation and theoretical concept. Also, there are reviewed some of its implementation problems as well as its possible solutions.

INTRODUCCION:

En nuestros días, el problema de las comunicaciones tiene que ver directamente con el avance de la civilización. Nuestra sociedad se mueve en término de intercambios de recursos naturales (como el petróleo), manufacturados (como las máquinas), de sustitución de valor (el dinero) y en especial, de la Información.

El intercambio de Información de un emisor a un receptor a través de algún medio es lo que podemos definir como Comunicación. Dentro de este marco, una comunicación puede ser desde un mensaje escrito en un papel adherido a una pizarra (siempre que alguien lo lea) hasta una imagen digitalizada enviada por una sonda viajando en el espacio interplanetario y procesada por alguna computadora.

La actual tendencia de las comunicaciones ha ido evolucionando desde un esquema en que las personas debían acoplarse a las instalaciones de los medios de comunicación (como en el caso de la telefonía clásica, en que

el teléfono está dispuesto en un lugar fijo) a uno más acorde con la necesidad constante de movimiento de los usuarios. O sea, la tendencia es la de que los medios deben acoplarse a las personas, y no al contrario.

El objetivo de este artículo es limitarse a un cierto tipo de comunicación: la Comunicación Personal (P.C.), particularmente de la Telefonía Celular (T.C.). Se describirá su funcionamiento desde un punto de vista general y se mencionarán algunos problemas que surgen de su implementación, así como sus soluciones.

2. DESCRIPCION DEL SISTEMA TELEFONICO CELULAR:

El Sistema de Telefonía Celular (STC) nació con el propósito de proveer un servicio telefónico a gran cantidad de usuarios en sus automóviles. Sistemas anteriores no probaron ser eficaces en este sentido puesto que sus capacidades eran limitadas. Por eso este sistema tuvo un gran impulso en la década de los 80, dada su mayor versatilidad y eficiencia [5].

* Maestría en Sistemas Digitales Universidad de Costa Rica.

2.1. Descripción exhaustiva de la implementación en redes telefónicas existentes.

El STC consiste básicamente en tres elementos: un sistema de conmutación telefónica móvil (o "Mobile Telephone Switching Office", MTSSO), una red de antenas o estaciones celulares y un sistema llamado de Eslabón de datos (o "Data Links") [9]. Las unidades portátiles de radio que los usuarios utilizan en vehículos o en mano son el medio físico de acceso al STC (Figura 1).

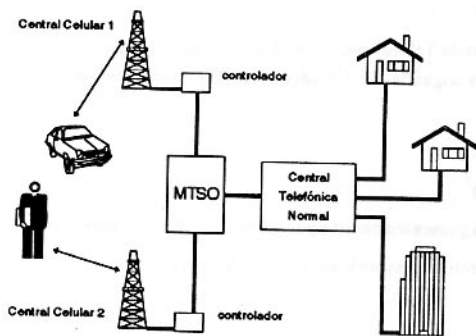


Figura 1: Sistema de Telefonía Celular.

El MTSSO es una unidad de hardware que en última instancia conecta al usuario del sistema con la red telefónica convencional. Esta unidad es la encargada de restringir el número de canales de voz de toda la red, lo que delimita la cantidad de usuarios que pueden hacer uso simultáneo del servicio. Aunque un STC regular trabaja con 395 canales de voz, pueden existir otros MTSSO para otras configuraciones. Por ejemplo, el sistema EMX 100-PLUS de Motorola alberga 150 canales, mientras que el EMX 500, de la misma firma, soporta un máximo de 850 canales de voz [11].

Las estaciones celulares son antenas de emisión-recepción que ligan las transmisiones entre los usuarios y la MTSSO local. Su distribución espacial depende de las características y topografía del terreno. Por lo general, la distancia entre dos antenas contiguas será menor dentro de una ciudad que en el campo. Luego se analizarán las razones por las que esto es así.

El sistema de Eslabón de datos es otra unidad de hardware que controla la transmisión de señales entre la MTSSO y la estación celular. En algunos casos se le denomina "Electrónica Remota" [3].

Geometría celular: Una "célula" es una extensión espacial dentro de la cual se pueden establecer las comunicaciones radiotelefónicas. El elemento fundamental (sin el cual el concepto no tendría sentido) es la antena transmisora-receptora, y todo el sistema electrónico codificador y decodificador local (es lo que se conoce como Estación Celular).

Existen tres criterios para definir el tamaño de la célula:

1. Por la potencia transmitida:
El contorno de la célula se mide a nivel del suelo, donde la potencia emitida por su estación celular y captada por un receptor móvil coincide con un valor mínimo especificado de antemano. Hay que notar que existe un centro de la célula que no necesariamente debe ser la antena de la estación, ya que la configuración topográfica en general no es uniforme (edificios, vehículos en movimiento, ríos, colinas, etc.). En estos casos se habla entonces de "centro virtual" de la célula, y se define un "radio virtual" R , como la distancia promedio desde el centro en todas direcciones hasta el contorno de la célula. (Figura 2).

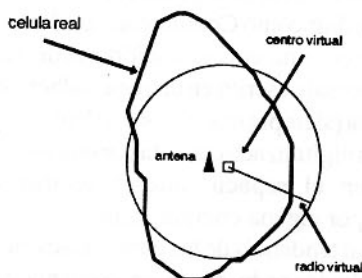


Figura 2: Geometría de la célula. (Por Potencia Transmitida).

2. Por la posición de antena receptora:

Para los portátiles, las antenas se montan en el techo del vehículo ("roof mounted") o bien en su ventanilla trasera ("glass mounted"). La que se monta sobre el techo permite 3 dB más de recepción que la otra, por lo que el contorno de la célula "vista" por ambas antenas es diferente. (Fig 3).

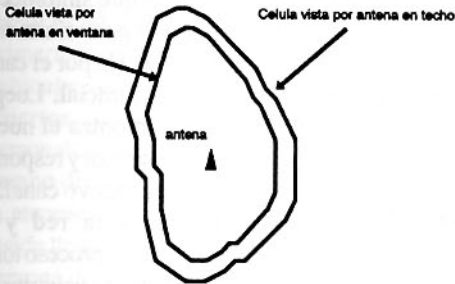


Figura 3: Geometría de la célula.
(Por Antena Receptora).

3. Por los canales de monitoreo y de voz:

Como luego se verá, el STC tiene dos clases de canales: el de monitoreo ("set up") y el de voz. Existe una diferencia en la potencia de transmisión que puede ser de 3 dB o más a favor de los canales de voz. Esto también hace que el tamaño de la célula difiera.

Cualquiera que sea la definición del tamaño de la célula, en última instancia la cobertura está determinada por la calidad percibida por los clientes (esto es, alta potencia, bajo nivel de ruido, etc.).

Operación: La comunicación entre el usuario con unidad portátil y la estación celular se hace en el espectro del Radio, precisamente en frecuencias alrededor del rango entre 800 y 850 MHz (37,5 y 35,5 cm respectivamente). Usualmente el STC contiene 416 canales dobles. Cada canal doble posee una vía "Forward" (comunicación de la estación a la unidad portátil) y una vía "Reverse" (comunicación del portátil a la estación). La primera vía trabaja en los 845 MHz y la segunda en los 800 MHz, ambas con anchos de banda de 30 kHz. Para cualquier llamada telefónica que use este sistema, las dos vías son utilizadas simultáneamente, es decir, cada canal doble ocupa un espectro de 60 kHz de ancho, y en total, los 416 canales requieren de casi 25 MHz de extensión.

De este total de canales de transmisión, 395 se utilizan para la voz y 21 para monitoreo ("setup") dentro del espacio que una estación alcanza a rastrear. De hecho, toda llamada celular se inicia en uno de los 21 canales de monitoreo, el cual analiza la potencia de la señal (por medio de su vía "forward") y decide cual conexión a una estación dada es más apropiada. Una vez definido lo anterior, se asigna la llamada a uno de los 395 canales de voz disponibles en el momento y el canal de monitoreo es liberado para captar otras llamadas.

Para una implementación digital como la AMPS (Advanced Mobile Phone Service), el proceso de determinar cuándo una unidad móvil está disponible para recibir una nueva llamada se llama "paging". La figura 4 muestra un diagrama esquemático de las radiocomunicaciones entre el móvil, la estación celular y el MTSO.

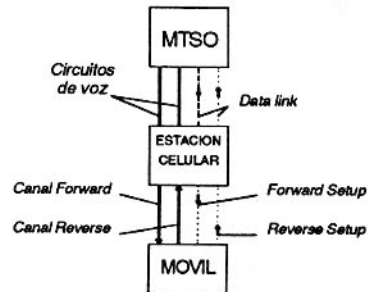


Figura 4: canales entre elementos AMPS

Un móvil en estado de espera de llamadas (llamado "enganche") sintoniza automáticamente el canal "setup" más potente. La estación celular constantemente envía pulsos sincrónicos hacia el móvil por la vía "forward setup", dentro de los cuales hay mensajes de "paging" que contienen el número telefónico de la unidad, la identificación del área de servicio, el número de canales "setup" por rastrear e información necesaria que el móvil usa para identificar los canales de acceso cuando el "paging" e el modo de acceso mismo no comparten los mismos canales.

Cuando un móvil determina que se está intentando accederlo, responde tratando de usar

el canal "reverse setup". Al mismo tiempo, otras unidades podrían estar haciendo lo mismo, por lo que se usan ciertas técnicas para minimizar las colisiones. En el momento en que logra ocupar el canal, le transmite a la estación su número de identificación, el cual se envía al MTSO por el eslabón de datos ("data link") de 2400 bits por segundo. Seguidamente, el MTSO le asigna un canal de voz desocupado y se transmite una señal al móvil por la vía "forward setup". Aquí, el móvil sintoniza el canal de voz asignado y lo notifica a la estación celular por medio de un tono de audio de 6 kHz. Esta confirmación llega al MTSO, que luego envía por la vía "forward" de voz una señal de alerta alertando al usuario del móvil que una comunicación está esperando ser establecida. Mientras tanto, otra señal de 10 kHz transmitida por la unidad por vía "reverse" de voz se envía a la estación. Cuando el usuario responde, el cambio de estado de esta señal notifica a la estación, y luego al MTSO, de que se ha respondido, y la llamada se desarrolla en forma normal.

Para el caso de llamadas originadas por el móvil, la forma es muy similar: el usuario envía la clave telefónica deseada cuando presiona la tecla "send" a través del canal "reverse setup", transmitiendo además su propio número de identificación. La información pasa de la estación celular al MTSO, adjudicándole éste un canal de voz desocupado al móvil. El proceso se completa cuando el MTSO accesa la red telefónica estándar hacia el teléfono deseado.

Una pregunta surge de inmediato: ¿cómo es posible que con sólo 395 canales, uno para un usuario, se puedan servir a varios miles? La respuesta se encuentra en el concepto de Reutilización de los Canales, que consiste en reusar las frecuencias de transmisión-recepción para dos células que estén separadas una cierta distancia mínima, de modo que entre las dos no exista interferencia. Analizaremos este problema con cuidado más adelante.

Handoff: Es aquí donde entra en juego un aspecto interesante que hace único al STC: el concepto de "Handoff". Cada estación celular toma muestras, a un ritmo de 50 veces por segundo, de las señales

de todos los usuarios que se mueven dentro de la celda. Si alguna de las señales de un canal dado baja a un nivel de potencia insuficiente debido al alejamiento del usuario, de forma automática se transfiere el control y monitoreo de la señal a la célula contigua (a la que el usuario se dirige).

El MTSO se encarga de informar al móvil, por la vía "forward" de voz, a que sintonice el nuevo canal. La unidad envía posteriormente un tren de señales breve de 10 kHz por el canal "reverse" de voz a la estación inicial. Luego, desconecta su transmisión, sintoniza el nuevo canal de voz, reconecta su transmisor y responde la señal de 6 kHz hallada en ese nuevo canal. El MTSO reconfigura entonces la red y la comunicación continúa. Todo este proceso toma alrededor de 0.2 s, de modo que los usuarios no notan efectivamente el cambio [1]. De esta forma, el canal de la primera célula se libera para poder ser usado por otro usuario.

Problemas de recepción con unidades portátiles:

De manera constante, la potencia percibida por los receptores está variando erráticamente de un máximo a un mínimo debido al desvanecimiento por trayecto múltiple por obstáculos diversos (se hablará de este problema más adelante). En la unidades vehiculares, el movimiento a lo largo de calles y autopistas hace que el valor promedio de la señal se mantenga a un nivel de potencia aceptable. No obstante, un problema mayor surge para las unidades portátiles, puesto que usualmente la persona permanece estacionaria en lugares donde quizá alguna de las señales (la "forward" o la "reverse") podría debilitarse debajo de los niveles aceptados. Esto representa otro problema que será tratado en la sección tercera.

2.2. Virtudes y debilidades del Sistema Telefónico Celular.

Es innegable que la comunicación portátil ofrece una amplia gama de ventajas sobre el tradicional sistema telefónico. Al ser inalámbrico, el usuario es liberado de tener que ajustarse al lugar en que el teléfono está instalado. Esto es, la comunicación no depende ya más de

la presencia física del receptor en el sitio adecuado, sino que el aparato mismo viaja con el usuario. Por supuesto que la consecuencia es una agilización de las comunicaciones persona-persona o persona-teléfono, así como un mejoramiento en la velocidad de realización de las actividades y trabajo de las personas y de la rápida atención de las emergencias.

No obstante, el diseño actual de este sistema móvil es tal que posee ciertas debilidades [3]. En primera instancia, se creó para equipo de radio vehicular, que en general se mueve en espacios abiertos (calles y autopistas). Los portátiles personales por el contrario se usan la mayoría del tiempo dentro de edificios, donde las pérdidas por la atenuación con las grandes masas de material puede llegar a valores de hasta 20 dB. O sea, si una persona desea mejorar una comunicación, debería salir a un espacio abierto o andar en su auto. Por supuesto que no es algo práctico ya que la mayoría de las actividades ciudadanas demanda presencia física de los usuarios dentro de los edificios. De hecho, la frecuencia de uso del portátil es unas diez veces mayor que la vehicular.

Otra limitación de las unidades portátiles personales está en su fuente de poder: mientras que para los vehículos el suministro de potencia es adecuado gracias a una batería de mayor capacidad, para los portátiles se utilizan pilas de baja potencia y rápida descarga. Aún más, en este caso la potencia de salida puede ser de unos 30 dB menos que para la vehicular.

Puesto que el STC usa un rango del espectro de radio, que al fin y al cabo es un rango del espectro electromagnético, las ondas portadoras pueden sufrir interferencias destructivas debido a la proximidad de cuerpos muy diversos, así como polarizaciones espaciales al azar. La consecuencia es un debilitamiento en la señal percibida por el usuario, y en el caso del portátil es mayor que para el vehicular.

A pesar de que el STC facilita la localización de una persona, deja de ser eficiente si el usuario no desea (o por alguna razón no puede) responder la llamada. Así, la intensidad del tráfico podría aumentar innecesariamente por el aumento de intentos fallidos de comunicación. En el caso extremo, debido al número relativamente pequeño

de canales de comunicación dentro de una célula, podría darse una saturación en la central, lo que es sinónimo de desconexión del servicio.

Por otra parte, a pesar de que la telefonía se usa para transmitir mensajes mediante la voz, ya existe cierta tendencia a querer transmitir datos [12]. La implementación analógica actual no lo permite con facilidad debido a los niveles altos de ruido en las líneas y a problemas que surgen con los "handoffs". Existe mucho interés en introducir masivamente la tecnología digital en el STC para resolver este inconveniente.

Otro aspecto es que en la actualidad existen seis arquitecturas celulares diferentes e incompatibles en distintas partes del mundo. Si eventualmente se llevara a cabo una transformación a sistemas celulares digitales (lo que se ha dado a llamar la Segunda Generación celular), habrá al menos tres estándares: Europa Occidental (Groupe Spécial Mobile, GSM), América del Norte (Electronic Industry Association Interim Standard, IS-54) y Japón. Tales estándares incompatibles son una desventaja puesto que no hay entonces posibilidad de comunicación entre usuarios de dos estándares distintos. Sin embargo, se piensa que una futura Tercera Generación celular, en la que se unifiquen los estándares, es algo necesario para un próximo futuro [5].

3. PROBLEMAS PRESENTES EN LA IMPLEMENTACION:

3.1. Atenuación de las señales por trayecto múltiple.

Las señales recibidas por un usuario sufren una atenuación debido a la pérdida de intensidad (potencia por unidad de área) por la propagación de la onda en el medio circundante. Es decir, conforme se aleja el receptor de la antena transmisora, la potencia percibida disminuye. Esto es algo característico de la propagación de las señales electromagnéticas. Los obstáculos que debe enfrentar una onda que se propaga en el espacio son los siguientes [13]:

1. Reflexión por la superficie de la Tierra: la onda reflejada puede interferir constructiva o destructivamente con la onda directa dependiendo de la diferencia de fase relativa. La intensidad de reflexión depende de las condiciones de la superficie (dureza, rugosidad, naturaleza, etc.) y la geometría del camino de las señales. Bajo ciertas condiciones, las pérdidas pueden alcanzar 20 dB más que los valores teóricos calculados.

2. Refracción: la velocidad de propagación de la onda depende de las condiciones de densidad de aire, temperatura, presión y partículas flotantes de la atmósfera. El efecto debido a la altura (donde todas estos aspectos son variantes) es una refracción de las señales hacia el suelo. lo que suele causar interferencias. Afortunadamente, sus magnitudes son lo suficientemente pequeñas como para no ser importantes, esto por el efecto de la distancia (figura 5).

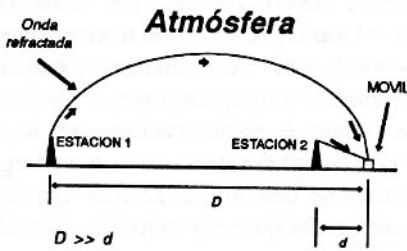


Figura 5: Refracción de la onda.

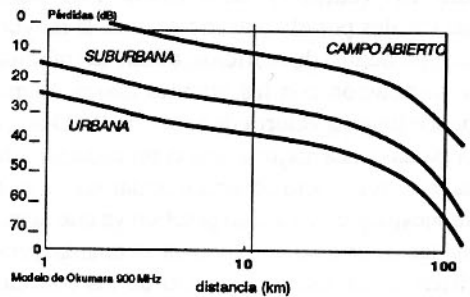
3. Superrefracción: se encuentra en ciertas regiones costeras y es causada por variaciones apreciables en los índices de refracción debidas a masas de aire en movimiento por diferencias de temperatura entre la tierra y el mar.

4. Pérdidas por edificios: en zonas urbanas son precisamente estas las causantes de las mayores atenuaciones. Las señales llegan en todas direcciones y con fases arbitrarias, por lo que es imposible describir la señal recibida usando modelos determinísticos. Por tanto, debe recurrirse a la estadística para intentar obtener

resultados probables con el fin de planificar la instalación del servicio.

La atenuación de la onda por estos obstáculos es lo que se conoce como Desvanecimiento por Trayecto Múltiple (DTM). En la figura 6 tenemos unas curvas típicas de desvanecimiento de la señal con la distancia según un modelo típico que toma en cuenta estos factores (modelo de Okumara).

Figura 6: curvas según modelos



Cálculo de intensidad libre: Definamos la célula como un contorno circular de radio virtual R (ver figura 2), cuyo centro sea la antena receptora. De la sección 2.2 sabemos que en ese contorno, la potencia percibida es la mínima necesaria para establecer una buena comunicación (el valor mínimo se escoge de acuerdo con algún criterio de implementación). Llámese tal valor "I₀". Para radios menores a R, el valor de la intensidad "I" percibida por el usuario debe ser mayor (I > I₀), figura 7.

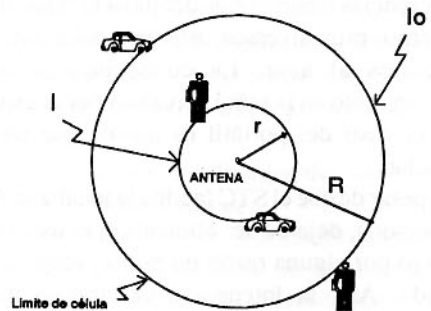


Figura 7: Intensidades de señal

Si suponemos inicialmente que cualquier tipo de absorción debida al medio es despreciable, tendremos por conservación de la energía que:

$$E(r < R) = E_o(r=R) \quad (1)$$

donde E representa la energía del frente de ondas propagándose esféricamente en el espacio a una distancia "r" de la fuente (la antena). Ahora bien, dado que:

$$E(r) = I(r) \cdot A(r) \quad (2)$$

con A (r) el área de la esfera de propagación cuyo radio es "r", tal que:

$$A(r) = 4 \pi r^2 \quad (3)$$

entonces, introduciendo (2) y (3) en (1) obtenemos:

$$I \cdot r^2 = I_o \cdot R^2 \quad (4)$$

o bien:

$$I/I_o = (R/r)^2 \quad (5)$$

Esta ecuación nos dice que la atenuación de la intensidad debido al efecto de alejamiento es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de separación receptor-emisor.

Por conveniencia, definimos la escala decibelia:

$$b = 10 \cdot \log(I/I_o) \quad (6)$$

con b en dB. Tomando (5) e introduciéndolo en (6), se obtiene:

$$b = 20 \cdot \log(R/r) \quad (7)$$

Esto nos indica que la atenuación referida es de 20 dB por década (la señal se reduce en potencia a 20 dB cuando la distancia del receptor aumenta por un factor de diez).

Todo este análisis se hizo tomando una situación ideal. En la realidad, el efecto del DTM hace que la señal varíe erráticamente

alrededor de cierto nivel promedio, quizá de la forma:

$$I/I_o = (R/r)^\alpha \quad (8)$$

con $\alpha \geq 2$. La magnitud de la desviación depende en mucho de las condiciones borderantes del receptor.

Aproximación al cálculo del DTM: No existe una forma determinista para este cálculo, por lo que se plantea el problema desde un punto de vista estadístico. Según W.C. Lee [7], "la señal r(t) percibida por el usuario tiene dos componentes: m(t) y r_o(t). El primero se llama media local, desvanecimiento de término largo o desvanecimiento log-normal, que se debe al contorno de terreno entre la estación celular y la unidad móvil. El segundo se denomina desvanecimiento por trayecto múltiple, desvanecimiento de término corto o desvanecimiento Rayleigh, el cual se debe a ondas reflejadas por los edificios de alrededor y estructuras construidas por el hombre. La expresión para m(t) puede obtenerse de la siguiente integral:

$$m(t) = \int_{\tau-T}^{\tau+T} r(t) \cdot dt \quad (9)$$

donde 2T es el intervalo de tiempo necesario para promediar r(t). T se determina a partir de la razón de desvanecimiento de r(t). Usualmente es de 20 a 40 longitudes de onda [8].

El desvanecimiento r_o(t) se obtiene de:

$$r_o(t) \text{ [dB]} = r(t) - m(t) \text{ [dB]} \quad (10)$$

r_o(t) sigue una distribución de Rayleigh asumiendo que solo ondas reflejadas de alrededores locales son las que se reciben (normal para el ambiente del móvil)."

Se ha comprobado que, para un auto en movimiento, la intensidad de la onda dispersada alcanza valores entre los 10 y 22 dB de atenuación [14]. Otros estudios demuestran que las estructuras construidas por el hombre generan trayectos totalmente aleatorios cuando las unidades

receptoras se hallan muy cerca de aquéllas [6]. Para el caso de unidades portátiles manuales, es importante el efecto de penetración de la onda en

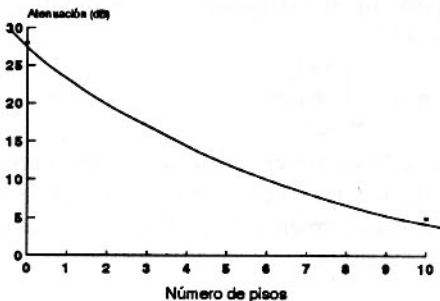
edificios [13]. La siguiente tabla recopila datos de atenuación por la presencia de diversos materiales en las estructuras.

Elemento de construcción	Atenuación(dB)	Desv.Estan.(dB)
Pared de bloques de concreto de 8 pulgadas	7	1
Apartadero de madera y ladrillo	3	0.5
Apartadero de aluminio	2	0.5
Paredes de metal	12	4

Fuente: [6].

Es interesante añadir que la atenuación disminuye conforme el receptor se sitúa en pisos más altos (figura 8).

Figura 8: curva típica de atenuación



Los problemas que presenta el DTM hacen que se requiera optimizar los diseños de las antenas (forma, polarización y ancho de banda), tanto para las estaciones celulares como para las móviles, además de sofisticar en mayor grado la electrónica de detección y emisión de señales.

3.2.El reuso de la frecuencia.

Anteriormente se mencionó el problema que existe al intentar servir varios miles de usuarios con tan solo unos cientos de canales de voz. La solución está en reutilizar las frecuencias de una

célula en otra que se encuentre lo suficientemente alejada. El reuso de la frecuencia es el concepto fundamental del STC.

Bajo este principio, usuarios de distintas regiones geográficas (células) pueden hacer uso simultáneo de la misma frecuencia de transmisión sin que haya interferencia entre ambas células. La eficiencia de este concepto depende del número de células que reusan frecuencias circundantes a una célula dada, del tipo de terreno geográfico, de la altura de la antena de la estación y de la potencia transmitida.

Anteriormente vimos que una célula tiene un radio virtual, el cual llamamos R . Sea D la distancia de separación de las células que usan las mismas frecuencias para sus canales de voz (llamadas células co-canales). Ver figura 9.

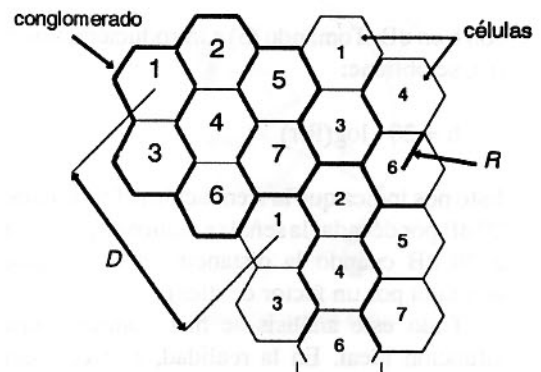


Figura 9: Patrón celular

El parámetro que cuantifica la calidad aceptable de voz en el receptor es $(C/I)_r$, llamada relación mínima portador a interferente. K es el patrón de reuso del sistema de células, y es el número de células que deben usar frecuencias distintas puesto que sus distancias de separación no son lo suficientemente grandes para hacer el reuso. En otras palabras, hablamos de un conglomerado de células. La relación entre D y R está dada por la siguiente ecuación [10,cap.2]:

$$Q = D/R = \sqrt{(3K)} \quad (11)$$

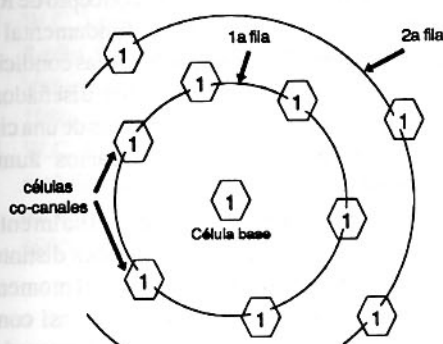


Figura 10: células interferentes

La figura 10 muestra una estructura de células co-canales (que son las que pueden interferir entre sí). Vemos que alrededor de la célula de interés existe una primera fila ("tier") de células interferentes cuya distancia es la más próxima (precisamente la distancia D). Un poco más alejadas están las células de la segunda fila (a distancias $2D$), etc. Dependiendo del número de células interferentes de la primera fila (llamado K_0) y de la razón portador-interferente del receptor, $(C/I)_r$, así variará la distancia D . (Las contribuciones de las otras filas son de valores tan pequeños que pueden ser despreciadas). Entonces, tendremos:

$$(C/I)_r = \frac{C}{K_0 \sum_{k=1}^{\infty} D_k^{-\alpha}} \quad (12)$$

La sumatoria expresa todas las contribuciones de las células de la primera fila. En un sistema hexagonal, $K_0 = 6$ para la primera fila. Puesto

que la intensidad de la señal recibida C depende del inverso de R , y la intensidad de señal interferente depende del inverso de D (elevados a cierta potencia $\alpha \geq 2$), tendremos:

$$(C/I)_r = \frac{R^{-\alpha}}{\sum_{k=1}^{K_0} D_k^{-\alpha}} \quad (13)$$

donde α es la pendiente de pérdida por propagación. En el caso de no interferencia, C es proporcional a R^{-2} , como vimos en la sección 3.1 (ec. 4). Por efecto del DTM sin embargo, puede llegar hasta el valor de 5.

Para un sistema de antena omnidireccional, con D_k igual para todas las células co-canales, tendremos:

$$(C/I)_r = \frac{R^{-\alpha} \cdot Q^{-\alpha}}{6 D^{-\alpha}} = \frac{Q^{-\alpha}}{6} \quad (14)$$

Esto es:

$$Q = [6 \cdot (C/I)_r]^{1/\alpha} \quad (15)$$

Se concede en general un $(C/I)_r$ de 18 dB mínimo para recepción aceptable [10,cap.2]. Se obtiene pues:

$$Q = 4,41$$

O lo que es lo mismo: $D = 4,41 R$. Para un patrón de $K = 7$ células, la ecuación (11) da $Q = 4,6$ lo que coincide bastante bien con el Q calculado por (15) [7].

En suma, vemos que un patrón celular de conglomerado de 7 células brinda un reuso de frecuencia aceptable para niveles de recepción.

El análisis anterior no es del todo correcto para decidir que la configuración de 7 células es la óptima. De hecho, todo diseño de sistemas físicos debe hacerse calculando los peores casos, o casos extremos del sistema, para comprobar si realmente estos responden a las expectativas iniciales del problema. Siguiendo esta línea, el peor caso que puede ocurrir en cuanto a interferencias con otras co-células es cuando un móvil se encuentra justo en el límite de su célula (figura 11). En esta situación, es posible demostrar [10,cap.6] que la razón portador-interferente $(C/I)_r$ baja de 18 dB a 14,5 dB, lo cual es más bien bajo. Así, el sistema con $Q = 4,6$ no es suficientemente adecuado.

Existen otras posibles configuraciones. Por ejemplo, $K=9$ y $K=12$, en las que se calcula:

$$(C/I)_s = 19,3 \text{ dB } [K=9]$$

$$(C/I)_s = 22,6 \text{ dB } [K=12]$$

Usando la relación (11), obtenemos:

$$D = 5,2 R [K=9]$$

$$D = 6,0 R [K=12]$$

La desventaja con estas alternativas está en el número de canales usado por célula: cuanto menor sea el número disponible de canales, menor será la eficiencia del servicio puesto que habrá más probabilidad de colisiones de llamadas entre usuarios de una misma célula. Si por ejemplo, el sistema dispone de un total de 395 canales de voz por conglomerado, entonces:

Para $K=9$: $395/9 = 44$ canales por célula.

Para $K=12$: $395/12 = 33$ canales por célula.

Para $K=7$: $395/7 = 56$ canales por célula.

Vemos que en este caso, es más favorable la estructura de 7 células por conglomerado. Escoger el número adecuado de células es algo que debe ser estudiado con detenimiento atendiendo las necesidades y condiciones locales.

Evidentemente, hay ciertas diferencias en estos parámetros si el servicio se brinda en la ciudad o en el campo. Si tenemos que en las ciudades el efecto de desvanecimiento es más marcado, las distancias R y D serán menores, pero tales que el valor de K será prácticamente el mismo. Los obstáculos también afectan a $(C/I)_s$, de modo que por todo punto de vista, el tamaño de las células se ve reducido.

Este aspecto no constituye una debilidad absoluta, sino una ventaja relativa, ya que en las ciudades, la densidad potencial de usuarios es bastante mayor que en el campo, lo que nos obliga a aumentar el reuso de las frecuencias disminuyendo por ende el tamaño de las células. El problema del desvanecimiento de las señales y del gran número de usuarios se soluciona con el reuso de los canales.

4. CONCLUSION:

El Sistema de Telefonía Celular es un sistema de Comunicación Personal de avanzada en cuanto al objetivo de dar al usuario un medio versátil y eficiente de comunicación. Su implementación es posible en lugares en los que exista una red

telefónica convencional a la cual acoplarse. El concepto de la Célula es una herramienta que logra hacer del STC un sistema práctico.

Con todo esto, sin embargo, hemos visto que para implantar el servicio en cierto lugar dado, que generalmente es una ciudad, es necesario vencer ciertos problemas de diseño. El Desvanecimiento por Trayecto Múltiple de las señales limita en bastante grado su recepción limpia, y obliga a refinar en mucho la electrónica interna de los componentes del sistema. Su consecuencia directa es un aumento en los costos de operación y mantenimiento. Por otro lado, el concepto de Reuso de las Frecuencias a pesar de ser fundamental en el éxito del sistema, depende mucho de las condiciones locales. Esto también obliga a los diseñadores a recalcular los parámetros importantes de una ciudad a otra, o si el número de usuarios aumenta considerablemente.

Otros inconvenientes que actualmente se presentan son la existencia de patrones distintos de diseño entre países, de modo que por el momento es difícil la compatibilidad de sistemas, así como la falta de promulgación a nivel oficial del uso exclusivo de frecuencias de trabajo para el servicio, algo que ocurre en los Estados Unidos, por ejemplo.

En el futuro, estos problemas podrán irse solucionados en la medida en que los sistemas actuales demuestren su eficiencia, lo cual han hecho con creces. Creemos que Costa Rica, concretamente en la Gran Área Metropolitana, es posible introducir este sistema, y así satisfacer necesidades de ciertos sectores productivos que verían en la Telefonía Celular un medio muy ventajoso de comunicación.

BIBLIOGRAFÍA:

- [1] F. H. Blecher, *Advanced Mobile Phone Service*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. VT.29, may. 1980, pp. 238-244.
- [2] D.C. Cox, *Universal Digital Portable Radio Communications*, Proceedings of the IEEE, abr. 1987, pp. 436-440.
- [3] D.C. Cox et al, *Universal Digital Portable Communications: a system perspective*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, jun. 1987, pp. 764-773.

- [4] S. Ginn, *Personal Communications Services: expanding the freedom to communicate*, IEEE Communications Magazine, feb. 1991, pp. 30-39.
- [5] D.J. Goodman, *Trends in Cellular and Cordless Communications*, IEEE Communications Magazine, vol 29, jun. 1991, pp. 31-40.
- [6] F. Ikegami y S. Yoshida, *Analysis of Multipath Propagation Structure in Urban Mobile Radio Environments*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP 28, jul. 1980, pp. 531-537.
- [7] W.C. Lee, *Elements of Cellular Mobile Radio Systems*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol VT 35, may 1986, pp 48-56.
- [8] W.C. Lee, *Estimate of local power of a mobile radio signal*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol VT 34, feb. 1985, pp. 22-27.
- [9] W.C. Lee, *In cellular telephone, complexity works*, IEEE Circuits & Devices, ene. 1991, pp. 26-32.
- [10] W.C. Lee, *Mobile Cellular Telecommunication System*, New York, Mc Graw-Hill, 1989.
- [11] Motorola, *EMX Electronic Switching Equipment, a family of mobile telephone exchanges*, brochure, 1987.
- [12] J. Shandle, *Freedom doesn't come easy*, Electronics, mar 1991, pp. 45-48.
- [13] Special Issue on Mobile Radio Propagation, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 37, feb. 1988, pp. 3-72.
- [14] M. Tanaka, *An Experimental Study on the Intensity of Scattering Wave by Automobile Body as Multipath Source in Mobile Communications*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 39, feb. 1990, pp. 2-5.

