

Tema 3 – Dimensionado de sistemas celulares

Ramón Agüero Calvo

*En la elaboración de estos apuntes han contribuido:
Ramón Agüero Calvo, Luis Muñoz Gutiérrez*

Contenidos

- Introducción a las comunicaciones móviles
- El concepto celular: reuso de frecuencias
- Interferencia co-canal
- Traspasos o *handovers*
- Eficiencia: sectorización y división celular

Contenidos

- Introducción a las comunicaciones móviles
- El concepto celular: reuso de frecuencias
- Interferencia co-canal
- Traspasos o *handovers*
- Eficiencia: sectorización y división celular

¿Qué son las comunicaciones móviles?

- Comunicaciones entre estaciones que se mueven libremente, en entornos...
 - Terrestre
 - Marítimo
 - Aeronáutico
- Desarrollo en paralelo a las comunicaciones cableadas
 - Necesidades complementarias [Ser capaces de comunicarse en movimiento]
 - A día de hoy es mayor el número de usuarios de telefonía móvil que el de telefonía fija
- Inicialmente privadas (emergencia, policía, etc), sin conexión con la red pública
- Servicios
 - Busca personas
 - Telefonía móvil
 - Transmisión de datos, imágenes, etc

Historia de las comunicaciones móviles

Comunicaciones
Marítimas
[MORSE]



[1897]
Invención radio
Marconi

[1928]
Mejora de receptores
1er sistema
comunicaciones móviles

[1940]
Primer sistema
FM
Connecticut

[1947]
Bell origina el
concepto de red
celular



[1921]
Sistema de difusión
Policía de Detroit

[1933]
Primer sistema
bidireccional
New Jersey

[1946]
1er Servicio
telefonía/radio
nivel comercial
St. Louis

Extensión comunicaciones
móviles (departamentos policía)



Historia de las comunicaciones móviles

PTT (Push To Talk)
Encaminamiento manual



[1954]

Banda se desplaza
a 450 Mhz
(sobrecarga)

[1978]

Primeras pruebas
AMPS en Chicago y
ARTS en Washington DC

[1982]

Se empieza a
trabajar en el
sistema GSM



[1964]

Encaminamiento
automático (Bell)
Sistema MJ @150 Mhz

[1969]

Sistema MK
@450 Mhz

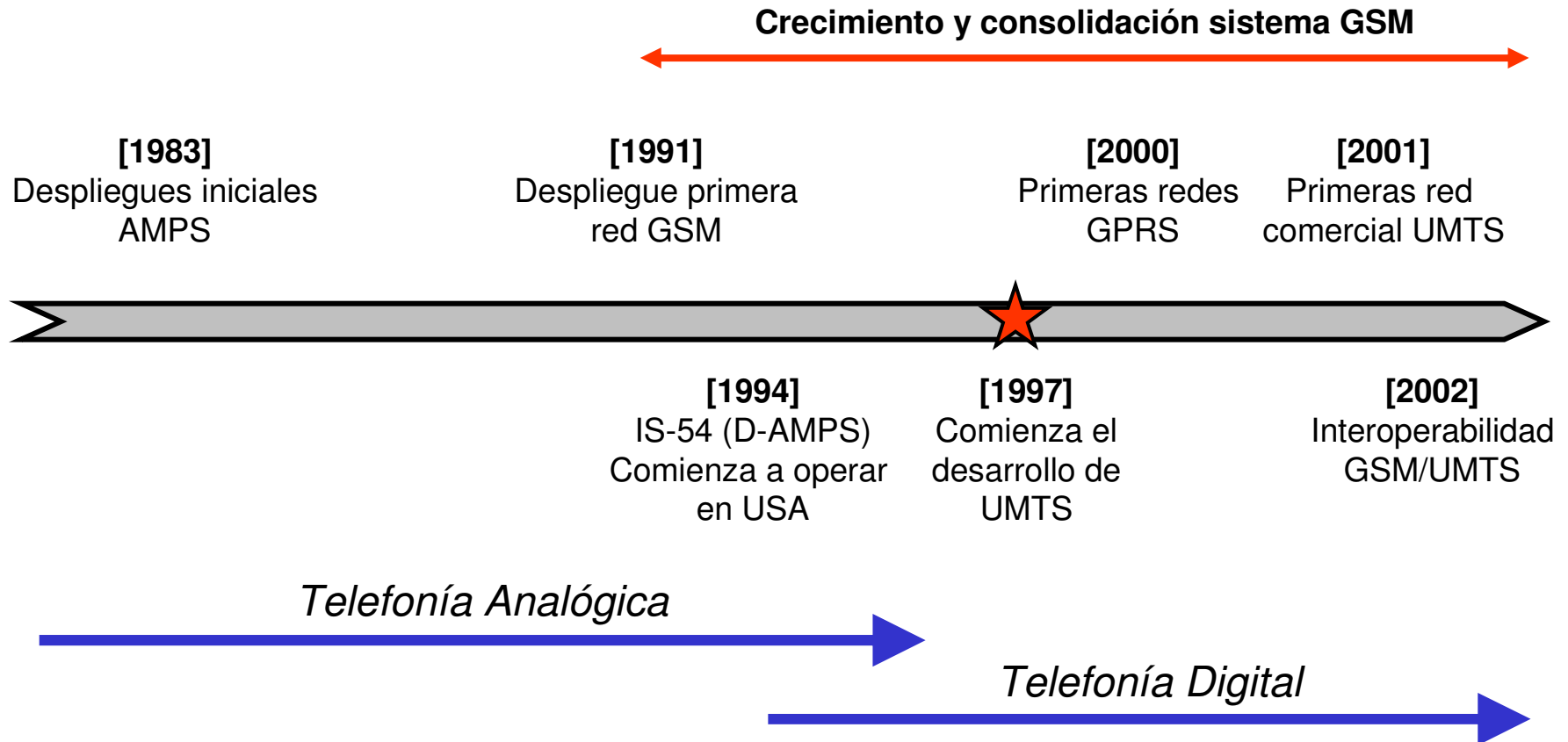
[1981]

Sistema NMT
(1er sistema que
se expande por más
de un país)

Sistema IMTS



Historia de las comunicaciones móviles



Historia de las comunicaciones móviles

- En la actualidad existen...⁽¹⁾
 - ~4·10⁹ usuarios GSM (penetración aproximada del 60%)
 - > 750 operadores (en 219 países)
- Nuevos mercados, países en expansión...[Datos de abril'08] ⁽¹⁾
 - China, con 509·10⁶ usuarios GSM, creciendo a un ritmo de 7·10⁶ usuarios por mes
 - India, con 193·10⁶ usuarios GSM, creciendo a un ritmo de 6·10⁶ usuarios por mes
 - Rusia (178·10⁶) y Brasil (93·10⁶)
- 2009
 - En China: +600·10⁶ usuarios
 - En India: 325·10⁶ usuarios en nov'09 [crecimiento 9.5·10⁶ conexiones mes]
- En 2009 se han superado las 450 Millones de conexiones UMTS⁽²⁾
 - De ellas >175 Millones son HSPA
 - Se crece a un ritmo de 9 Millones de conexiones HSPA al mes frente a los 5.5 M en 2008
- Se espera que las conexiones de banda ancha móvil (LTE) serán más de 400 Millones en 2015⁽²⁾

(1) Notas de prensa en GSM World (www.gsmworld.com)

(2) Notas de prensa en UMTS Forum (www.umts-forum.org)

Redes móviles analógicas (1ª generación)

- AMPS (*Advanced Mobile Phone System*)
 - USA en 1983-2008 y Australia en 1987-2000
 - Banda de 800 Mhz

- NMT (*Nordisk MobilTelefoni, Nordic Mobile Telephony*)
 - Se inició en los países nórdicos (Dinamarca, Noruega, Suecia y Finlandia)
 - Se ha empleado en otros países europeos (Holanda, Suiza, Polonia, Hungría, Chequia,...)
 - NMT450 (@450 Mhz) y NMT900 (@900 Mhz)
 - Prácticamente desaparecido en la actualidad (GSM)

- TACS (*Total Access Communication System*)
 - Versión de AMPS empleada en Reino Unido, España, Italia, etc...
 - Banda de 900 Mhz
 - No se emplea en la actualidad
 - En Japón se denominó JTACS

Redes móviles digitales (2ª generación)

- GSM (*Global Systems for Mobile Communications*)
 - Tecnología con cobertura prácticamente global
 - Frecuencias de 900 Mhz y 1800 Mhz
- IS-54 (*Interim Standard*)
 - Versión digital de AMPS (D-AMPS)
 - Usado en Estados Unidos
 - TDMA
- IS-95
 - USA
 - Basado en AMPS
 - Usa CDMA (*Code Division Multiple Access*)
- Evolución hacia la conmutación de paquetes
 - GPRS (*General Packet Radio Service*)

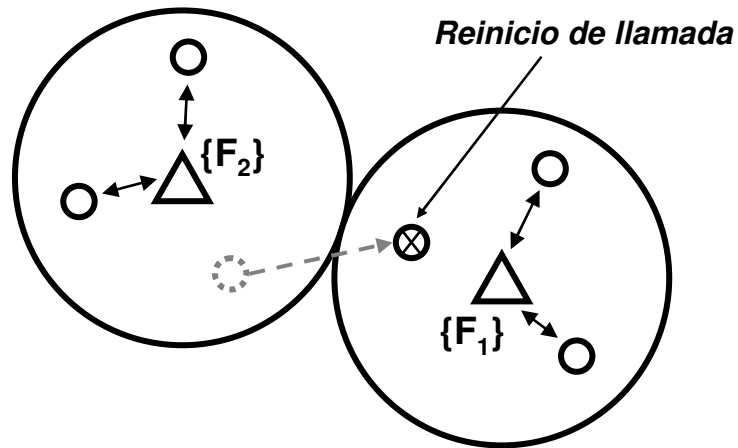
Futuro de las comunicaciones móviles

- Expansión de la 3G o UMTS (*Universal Mobile Telephone System*)
 - Sistema de banda ancha con cobertura global
 - Completamente basado en conmutación de paquetes e IP
 - Basado en CDMA
- El 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) se encarga de las especificaciones de los sistemas de comunicaciones móviles actuales y futuros
 - Recientemente se ha finalizado la Release-8 y se está trabajando en la Release-9
- HSPA (*High Speed Packet Access*)
 - Aparece en tráfico de bajada (downlink) en Release-5
 - Comercialmente disponible en 2005
 - En 2009 >175 M usuarios HSPA
- Se comienza a trabajar en LTE (*Long Term Evolution*)
 - Primeras especificaciones en Release-8

Contenidos

- Introducción a las comunicaciones móviles
- El concepto celular: reuso de frecuencias
- Interferencia co-canal
- Traspasos o *handovers*
- Eficiencia: sectorización y división celular

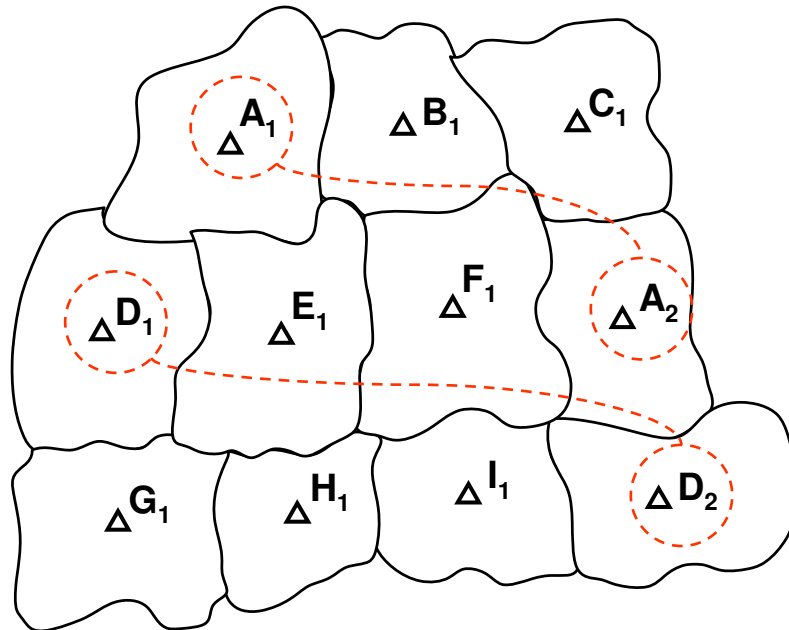
Sistemas pre-celulares



- Eficiencia: $\eta = \frac{K}{S} \frac{1}{B_T} \left[\frac{\text{canales}}{\text{km}^2 \cdot \text{Hz}} \right]$
 - K: # de canales (B_T/B_R)
 - S: Superficie
 - B_T : Ancho de banda total
 - B_R : Ancho de banda de cada canal

- Gran cobertura
 - Una única antena
 - Gran potencia
- Capacidad limitada, con gran probabilidad de bloqueo
 - En función de los recursos (canales) asociados a cada emplazamiento
 - En Nueva York (1970): 12 llamadas simultáneas en $\sim 2500 \text{ km}^2$
- Uso de frecuencias diferentes en cada emplazamiento autónomo
 - Para evitar interferencias
 - Escasez de frecuencias: Necesidad de reestructurar el sistema de telefonía móvil

El concepto celular

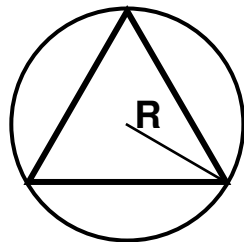
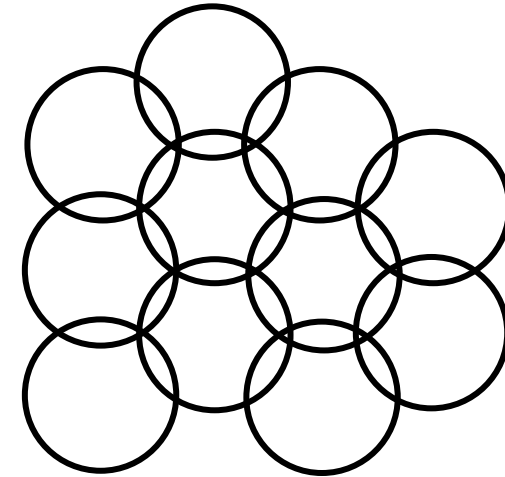


V.H. MacDonald, "The Cellular Concept" *The Bell System Technical Journal*. Vol 58, no 1. Enero 1979

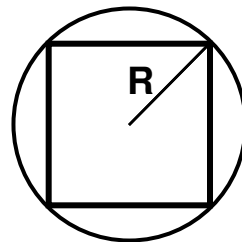
- Reuso de frecuencias en un "mapa celular"
- Celdas amorfas y e irregulares
- Uso de múltiples estaciones base (*base station*, BS) con menor potencia
- Cada BS tiene asignado un porcentaje del total de canales en el sistema
- A las BS cercanas entre sí se les asigna frecuencias diferentes
- Las mismas frecuencias son reutilizadas (a una distancia adecuada)
- Las estaciones base están interconectadas entre sí
- El área cubierta por una BS se denomina **célula**

El concepto celular

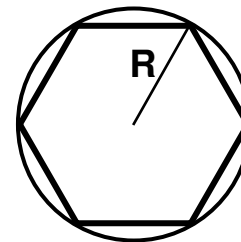
- El área de cobertura de una BS es sin forma
- Al comienzo de los sistemas celulares: necesidad de utilizar una forma geométrica regular
- La elección inmediata (cobertura circular) no es válida: zonas de solapamiento
 - Se necesita que se tesele completamente el terreno
- Elegir entre el triángulo, el cuadrado y el hexágono
 - El hexágono es el que tiene un área mayor: se necesitan menos BS para cubrir un terreno



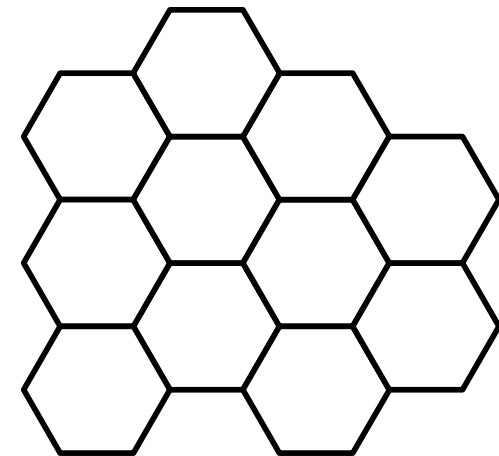
$$A_{\text{triángulo}} = \frac{3\sqrt{3}}{4} R^2$$



$$A_{\text{cuadrado}} = 2R^2$$



$$A_{\text{hexágono}} = \frac{3\sqrt{3}}{2} R^2$$



Reuso de frecuencias

- El elemento diferenciador de los sistemas celulares es el reuso de frecuencias
 - Mediante este proceso se asignan los diferentes canales a todas las células
- El grupo de células que *conjuntamente* usan todas las frecuencias disponibles se denomina **cluster**
 - El número de células por cluster (N) se denomina *factor de reuso*
 - Algunos autores llaman factor de reuso al inverso de N
- Usuarios de diferentes clusters pueden usar simultáneamente el mismo canal

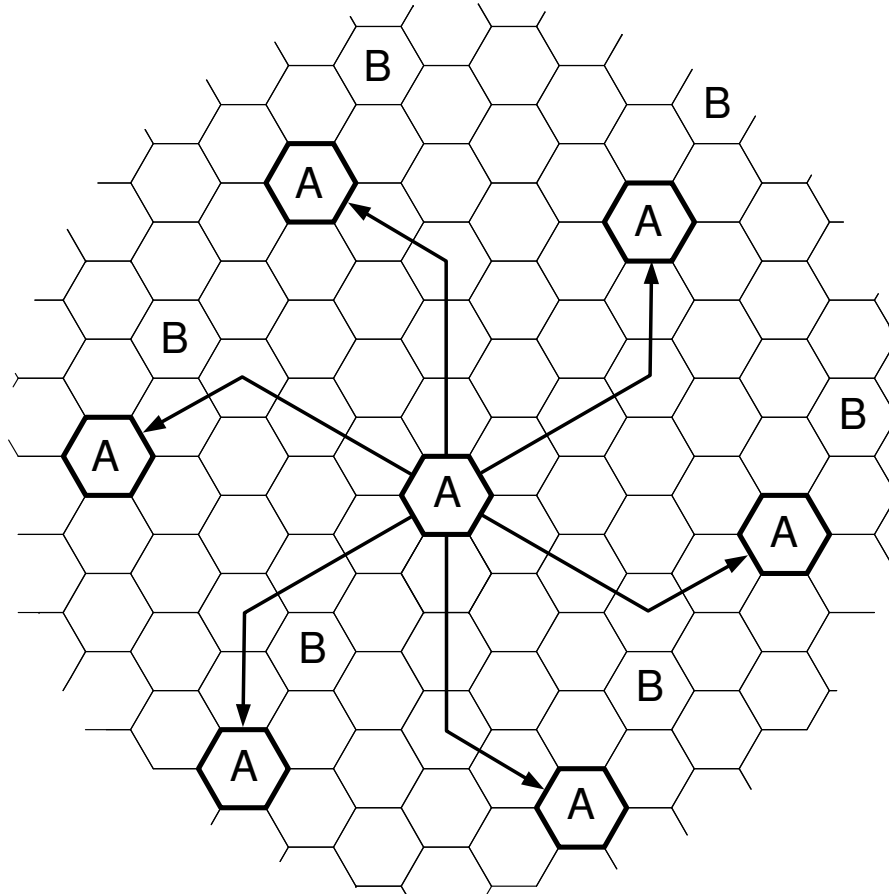
- Eficiencia

$$\eta_c = \frac{K/N}{S/N_c} \frac{1}{B_T} = \frac{K}{S} \frac{1}{B_T} \frac{N_c}{N} = \eta \frac{N_c}{N}$$

[canales / km²·Hz]

- K: # de canales (B_T/B_R)
- S: Superficie
- B_T: Ancho de banda total
- B_R: Ancho de banda de cada canal
- N: factor de reuso
- N_C: # total de células

Reuso de frecuencias



V.H. MacDonald, "The Cellular Concept" The Bell System
Technical Journal. Vol 58, no 1. Enero 1979

- Para asignar canales a las diferentes células se emplean dos parámetros: i, j
 - Desplazamiento de i células
 - Rotación de 60°
 - Desplazamiento de j células
- En el ejemplo de la figura
 - $i = 3, j = 2$
- A partir de i, j se obtiene el factor de reuso

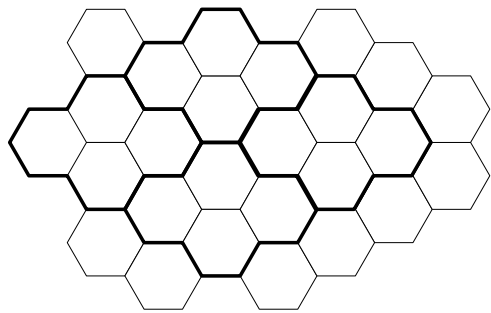
$$N(i,j) = i^2 + j^2 + i \cdot j$$
- Como i, j son enteros no todos los valores de N son geoméricamente realizables

Reuso de frecuencias

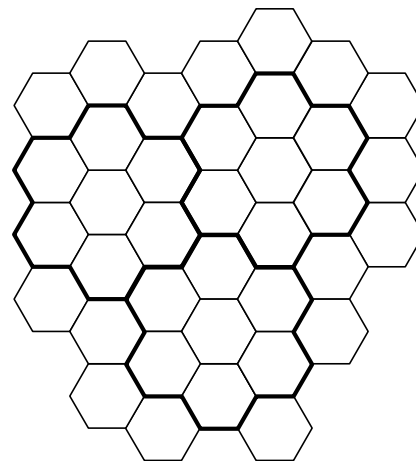
	0	1	2	3	4	5	6
1	1	3					
2	4	7	12				
3	9	13	19	21			
4	16	21	28	37	48		
5	25	31	39	49	61	75	
6	36	43	52	63	76	91	108

- En la tabla se muestran algunos factores de reuso factibles, para diversas combinaciones de i, j

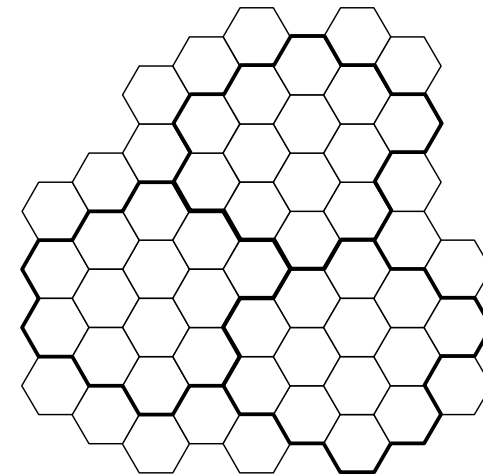
$$N(i,j) = i^2 + j^2 + i \cdot j$$



$i = 2, j = 0$



$i = 1, j = 2$



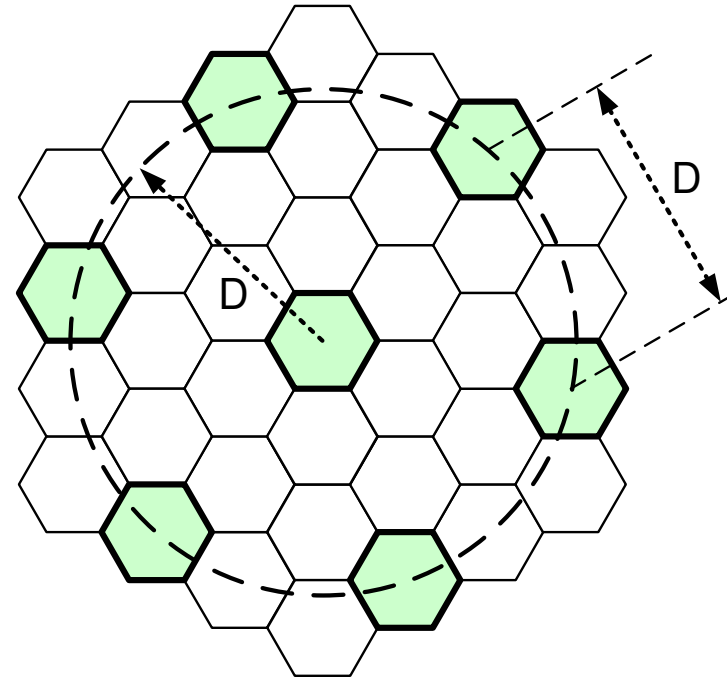
$i = 3, j = 1$

Contenidos

- Introducción a las comunicaciones móviles
- El concepto celular: reuso de frecuencias
- Interferencia co-canal
- Traspasos o *handovers*
- Eficiencia: sectorización y división celular

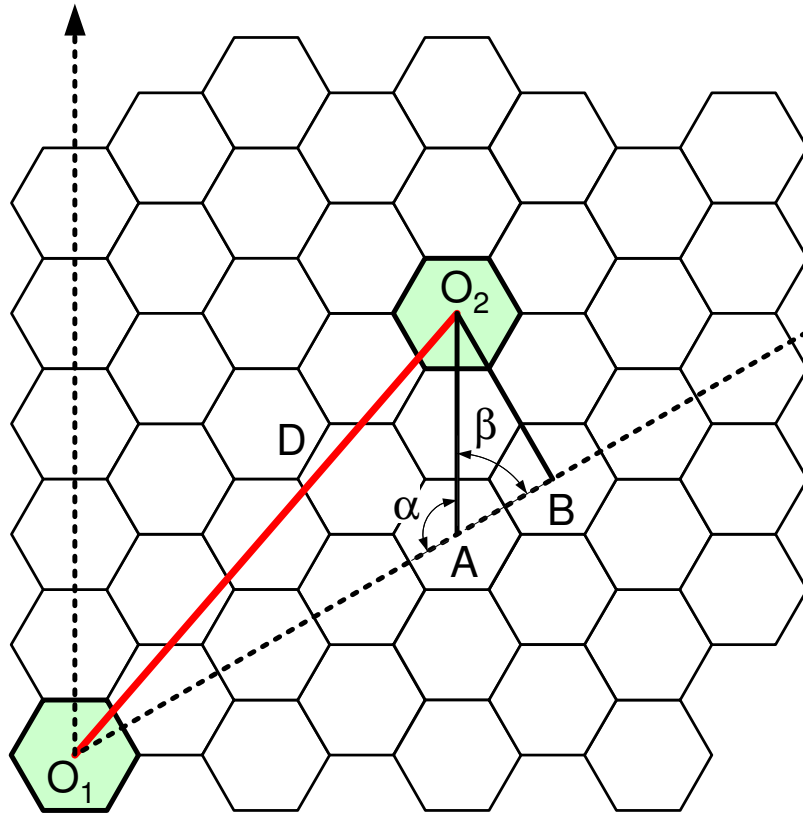
Interferencia co-canal

- La interferencia es el factor que en mayor medida limita el rendimiento de los sistemas celulares
- Hay varias fuentes de interferencia, pero la más relevante es la denominada co-canal
- Es consecuencia del reuso de frecuencias: hay células que trabajan en el mismo conjunto de canales
- No se puede reducir incrementando la potencia de transmisión
 - También se incrementaría la de las BS interferentes



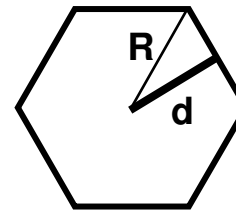
- Depende de la distancia de reuso (D)
 - A la que se encuentran las células interferentes (entre las localizaciones de las estaciones base)

Distancia de reuso



Ejemplo ilustrativo: $i = 4, j = 2$

- En un hexágono...



$$d = R \cos(\alpha) = \frac{\sqrt{3}}{2} R$$

- Por el teorema del coseno (triángulo O_1AO_2)

$$D^2 = \overline{O_1A}^2 + \overline{O_2A}^2 - 2\overline{O_1A}\overline{O_2A}\cos(\alpha)$$

$$- O_1A = 2di$$

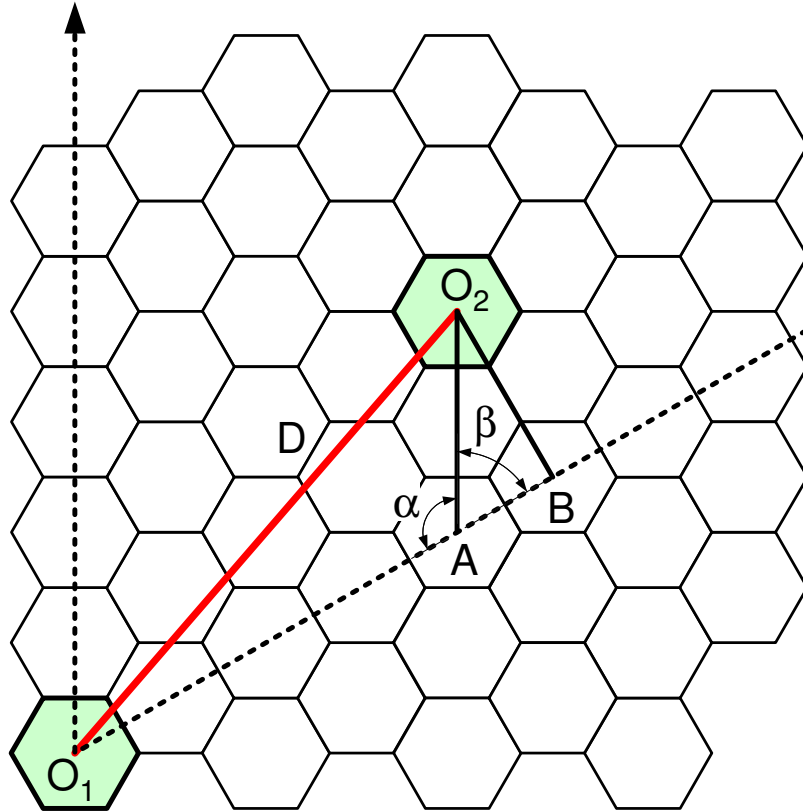
$$- O_2A = 2dj$$

- Luego ($\alpha = 120^\circ$):

$$D = \sqrt{(2di)^2 + (2dj)^2 - 2(2di)(2dj)\left(-\frac{1}{2}\right)} =$$

$$= \sqrt{(2d)^2(i^2 + j^2 + i \cdot j)} = 2d\sqrt{N} = R\sqrt{3N}$$

Distancia de reuso



Ejemplo ilustrativo: $i = 4, j = 2$

- Alternativamente:

$$D^2 = \overline{O_1B}^2 + \overline{O_2B}^2$$

- $O_1B = O_1A + O_2A \cos(\beta)$
- $O_2B = O_2A \sin(\beta)$

- Teniendo en cuenta que $\beta = 60^\circ$

$$D = \sqrt{\left(2di + 2dj \frac{1}{2}\right)^2 + \left(2dj \frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{(2d)^2 (i^2 + j^2 + i \cdot j)} = 2d\sqrt{N} = R\sqrt{3N}$$

- Al cociente D/R (Q) a veces se le denomina como **cociente de reuso co-canal**

Cálculo de la interferencia co-canal

- Se supone que se trabaja con antenas omnidireccionales
- La potencia de la señal de interés (portadora) será...

$$C = P_{TX} \frac{\beta}{R^\gamma}$$

- P_{TX} : potencia de transmisión de la BS
- β : constante
- γ : exponentes de pérdidas de propagación
(Típicamente $\in [2,4]$, entornos celulares)
- R: radio de la célula

(Se considera que el móvil está en el límite de la célula: PEOR CASO)

- La interferencia de una de las células co-canal será...

$$I_n = P_{TX} \frac{\beta}{D_n^\gamma}$$

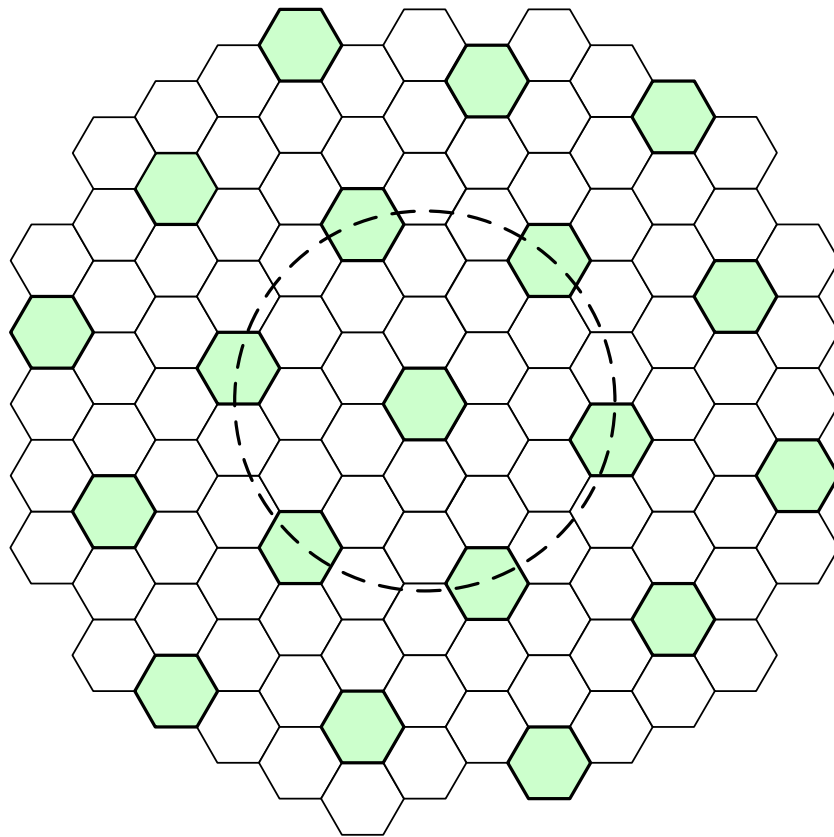
- D_n : distancia a la que se encuentra la n-ésima célula interferente

- La interferencia total vendrá dada por...

$$I_{Total} = \sum_n I_n = \sum_n P_{TX} \frac{\beta}{D_n^\gamma} = P_{TX} \beta \sum_n \frac{1}{D_n^\gamma}$$

- Hay que determinar el número total de células interferentes y la distancia con cada una de ellas

Cálculo de la interferencia co-canal



Ejemplo ilustrativo: $i = 2, j = 1$

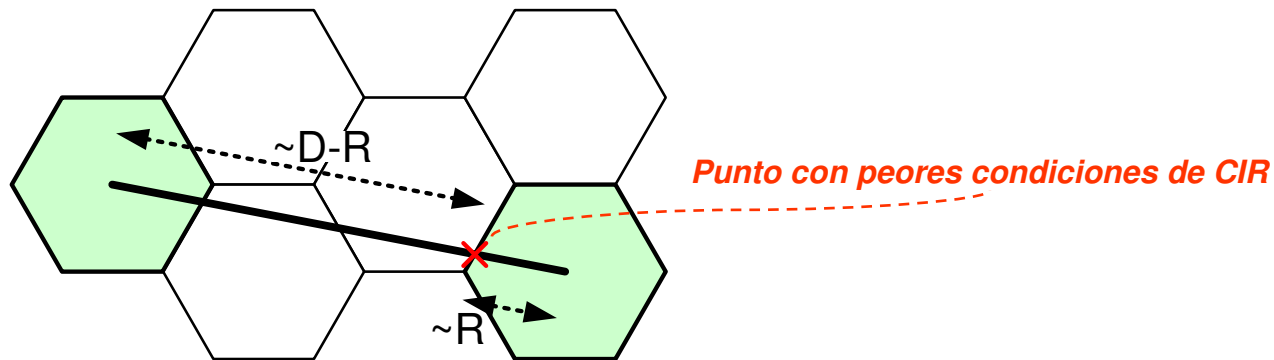
$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-\gamma}}{\sum_n D_n^{-\gamma}}$$

- Teselación hexagonal
 - Sólo se considerará la primera corona interferente
 - Hay 6 células interferentes
- Se asume que D_n es la misma para todas las células interferentes, igual a la distancia de reuso

$$\begin{aligned} \frac{C}{I} &= \frac{R^{-\gamma}}{\sum_n D_n^{-\gamma}} = \frac{R^{-\gamma}}{6 \cdot (D)^{-\gamma}} = \frac{1}{6} \left(\frac{D}{R} \right)^\gamma \\ &= \frac{1}{6} Q^\gamma = \frac{1}{6} (\sqrt{3N})^\gamma \end{aligned}$$

Cálculo de la interferencia co-canal

- En el peor caso, la distancia interferente es, aproximadamente, $D-R$

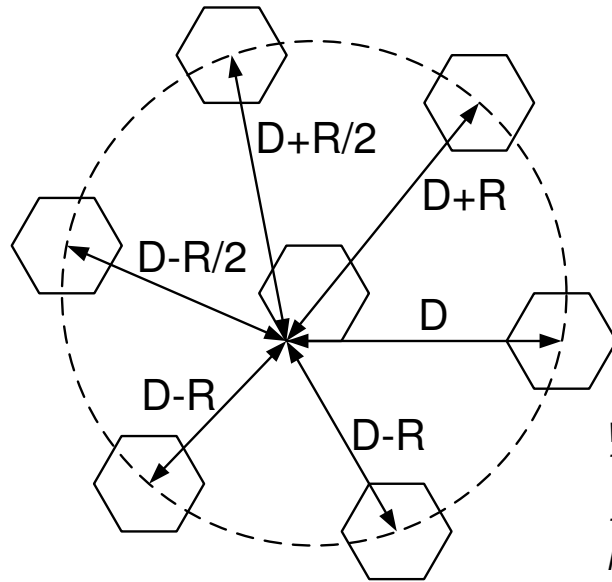


- Asumiendo que todas las BS están a la misma distancia, se tendría...

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-\gamma}}{\sum_n D_n^{-\gamma}} = \frac{R^{-\gamma}}{6 \cdot (D-R)^{-\gamma}} = \frac{1}{6} \left(\frac{D-R}{R} \right)^{\gamma} = \frac{1}{6} \left(\frac{D}{R} - 1 \right)^{\gamma} = \frac{1}{6} (Q-1)^{\gamma} = \frac{1}{6} (\sqrt{3N}-1)^{\gamma}$$

- Se trata de una aproximación pesimista, ya que asume la peor de las condiciones para todas las células interferentes: Diseño conservador

Cálculo de la interferencia co-canal



- Hay otras aproximaciones menos pesimistas
 - Se calcula la interferencia de las diferentes estaciones base (1ª corona) cuando el móvil se sitúa en el vértice de la célula bajo análisis
 - Las distancias con las BS interferentes se aproximan tal y como se muestra en la figura

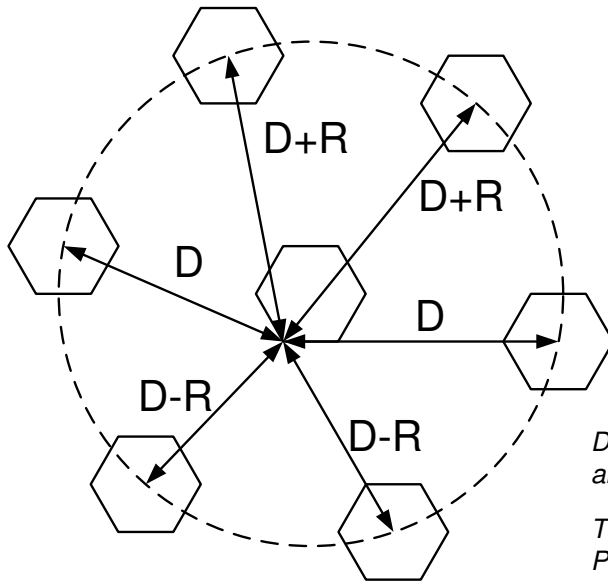
William C. Y. Lee, "Elements of Cellular Mobile Radio Systems" IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol VT-35, no 2. Mayo 1986

Theodore S. Rappaport, "Wireless Communications: Principles & Practice" Prentice Hall (1ª edición)

▪ Fórmula de Lee:
$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-\gamma}}{\sum_n D_n^{-\gamma}} = \frac{R^{-\gamma}}{2 \cdot (D-R)^{-\gamma} + D^{-\gamma} + (D+R)^{-\gamma} + (D-R/2)^{-\gamma} + (D+R/2)^{-\gamma}} = \frac{1}{2 \cdot (Q-1)^{-\gamma} + Q^{-\gamma} + (Q+1)^{-\gamma} + (Q-1/2)^{-\gamma} + (Q+1/2)^{-\gamma}}$$

Cálculo de la interferencia co-canal

- Mejora de la fórmula de Lee:



$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-\gamma}}{\sum_n D_n^{-\gamma}} = \frac{R^{-\gamma}}{2 \cdot (D-R)^{-\gamma} + 2 \cdot D^{-\gamma} + 2 \cdot (D+R)^{-\gamma}} = \frac{1}{2 \cdot (Q-1)^{-\gamma} + 2 \cdot Q^{-\gamma} + 2 \cdot (Q+1)^{-\gamma}}$$

Dharma P. Agrawal, Qing-An Zeng. "Introduction to Wireless and Mobile Systems" Thomson Brooks/Cole

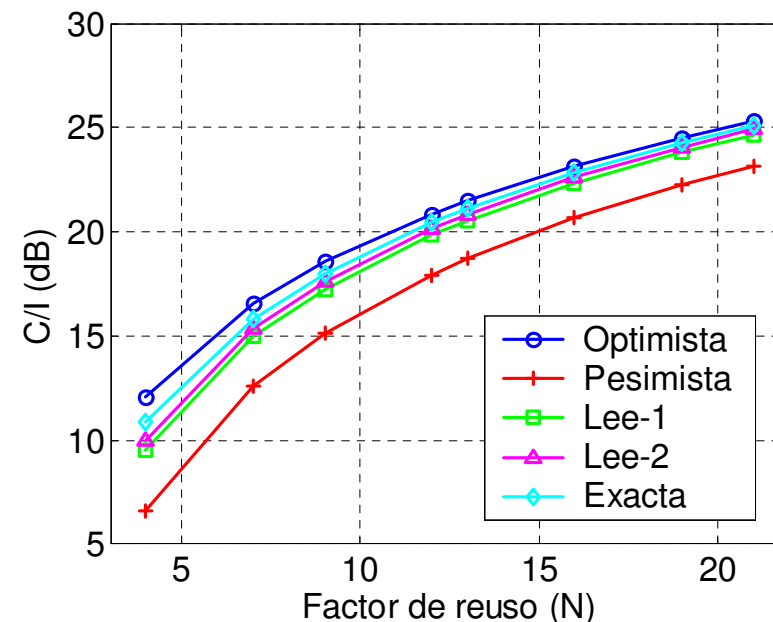
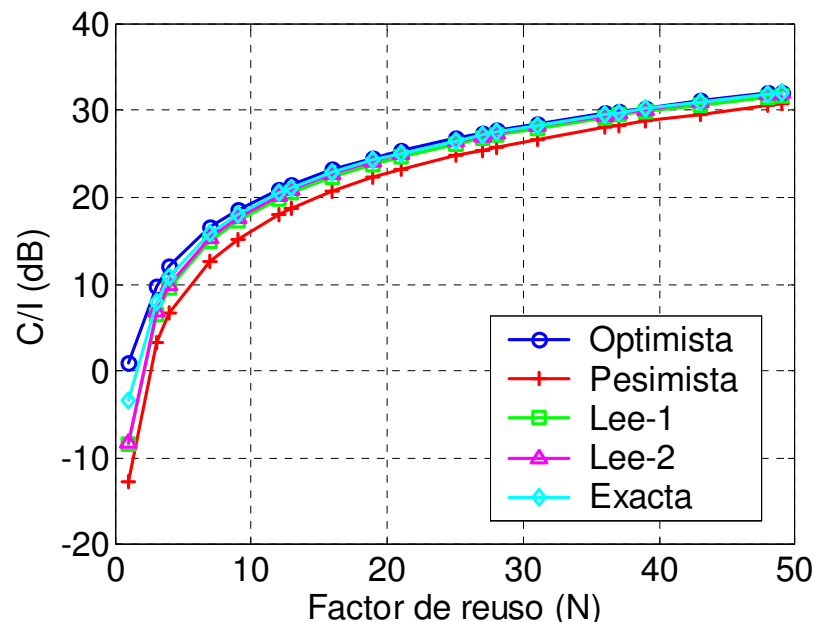
Theodore S. Rappaport, "Wireless Communications: Principles & Practice" Prentice Hall (2ª edición)

- Utilizando geometría hexagonal es posible encontrar una solución exacta para la C/I cuando el móvil está en un vértice de la célula⁽¹⁾
- También es posible realizar análisis estadísticos de la C/I (C e I se tratan como variables aleatorias)

⁽¹⁾ José María Hernando Rábanos, "Comunicaciones Móviles". Centro de Estudios Ramón Areces (2ª edición)

Cálculo de la interferencia co-canal

- Valores de C/I para $\gamma = 3.7$
 - La aproximación optimista se comportante razonablemente bien
 - La opción pesimista (diseño conservador) se puede emplear para tener en cuenta un margen de seguridad



Contenidos

- Introducción a las comunicaciones móviles
- El concepto celular: reuso de frecuencias
- Interferencia co-canal
- **Trasposos o *handovers***
- Eficiencia: sectorización y división celular

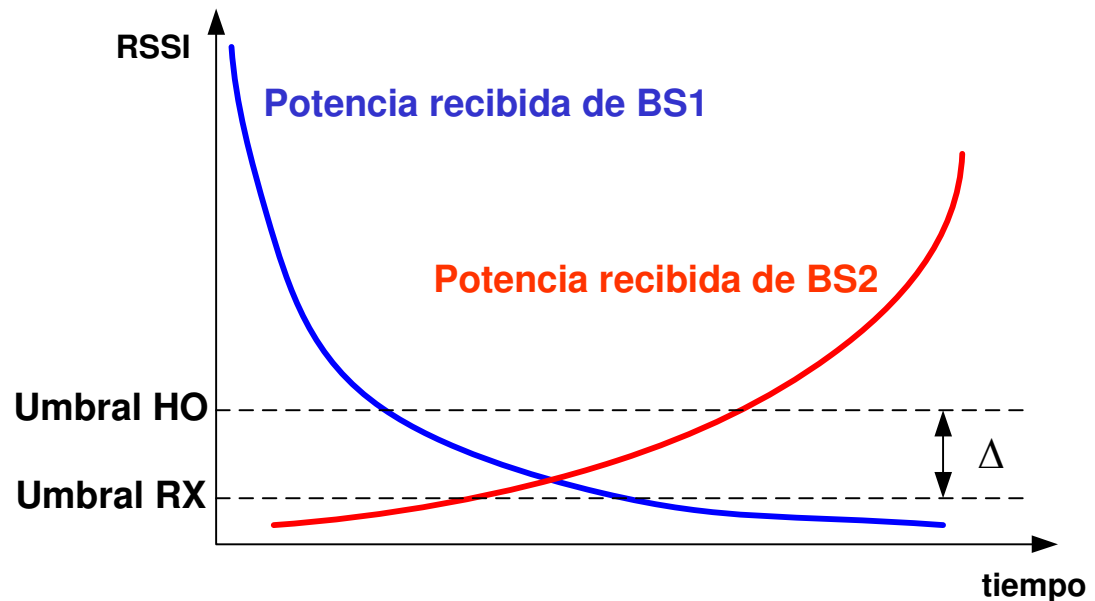
¿Qué son los *handovers*?⁽¹⁾

- Proceso de transferir una llamada en curso entre dos células cuando el móvil se desplaza
- Cuando la calidad del enlace con la BS actual baja, la comunicación pasa:
 - A una nueva célula (*inter-cell handover*)
 - A otro canal de la misma BS (*intra-cell handover*)
- Hay varios parámetros que se pueden utilizar para caracterizar la calidad de los enlaces
 - RSSI (Received Signal Strength Indicator)
 - BER (Bit Error Rate)
 - C/I
 - Carga (Tráfico actual)
 - ...
- Depende de la posibilidad de medida del sistema
- Puede no ser suficiente realizar medidas puntuales

(1) A veces también se les denomina **Handoffs**

Realización de *handovers*

- Los *handovers* (HO) deben realizarse de manera automática, sin la intervención directa del usuario
- Llevan asociado un incremento de la señalización y consumen tiempo
- Seleccionar un umbral a partir del cual iniciar el proceso de traspaso
 - Normalmente se selecciona un valor ligeramente superior al mínimo necesario para que una comunicación sea factible: $\text{Umbral HO} = \text{Umbral RX} + \Delta$
- Si Δ es grande: se producirían un número elevado (innecesario) de traspasos
- Si Δ es pequeño: habría poco tiempo para completar el traspaso antes de alcanzar el umbral de RX



Tipos de *handovers*

- Puede haber diferentes clasificaciones de los trasposos; la más habitual atiende a la entidad que toma la decisión de realizar el HO
- Network Controlled HandOff (NCHO)
 - La red es la que tiene la responsabilidad completa en el proceso de traspaso
 - También se encarga de realizar las medidas para conocer la calidad de los enlaces
 - Se utilizó en los sistemas celulares de 1^a generación: AMPS, NMT, TACS
- Mobile Assisted HandOff (MAHO)
 - Para reducir la responsabilidad de la red, el móvil se encarga de monitorizar el estado de los enlaces
 - Envío periódico de la información a la red
 - Se emplea en los sistemas celulares de 2^a generación: GSM, IS-95
- Mobile Controlled HandOff (MCHO)
 - El móvil controla completamente el proceso de traspaso
 - La red puede enviar medidas de calidad a los terminales
 - Se emplea en sistemas de telefonía sin hilos (DECT)

Medidas de rendimiento

- Probabilidad de bloqueo de nuevas llamadas
- Probabilidad de bloqueo de un traspaso
 - Terminación anómala de una llamada
- Probabilidad de realizar un traspaso
 - Tasa de cruce de fronteras entre células
- Tasa de HO por unidad de tiempo
 - La probabilidad de HO se puede determinar a partir de este parámetro y de la duración media de la llamada
- Probabilidad de HO no necesarios
- Retardo entre el momento en el que se inicializa y se completa el HO

Estrategias en los *handovers*

- Hay sistemas que tratan las peticiones de traspaso como si fuera una nueva llamada
 - En este caso la probabilidad de no aceptar un HO es igual a la de bloqueo de nuevas peticiones
- Otros sistemas priorizan los HO
 - Se considera que para el usuario es más molesto el terminar una llamada de manera abrupta una vez que ha comenzado
 - **Canal de guarda** (*Guard channel*)
 - Una fracción de los recursos totales se reserva únicamente para las peticiones de HO
 - El resto de recursos se emplea tanto para las nuevas llamadas como para los HO
 - Incrementa la probabilidad de bloqueo de nuevas llamadas
 - Se puede emplear con esquemas de gestión dinámica de recursos
 - **Encolamiento de traspasos** (Queuing of handoffs)
 - Se mantienen las peticiones en el sistema (cuando no hay recursos) durante cierto tiempo
 - Se puede llevar a cabo en el intervalo que va desde el Umbral_HO hasta el Umbral_RX

Contenidos

- Introducción a las comunicaciones móviles
- El concepto celular: reuso de frecuencias
- Interferencia co-canal
- Traspasos o *handovers*
- Eficiencia: sectorización y división celular

Eficiencia en sistemas celulares

- La idea es tratar de mejorar el comportamiento de los sistemas móviles celulares
- Aparecen diferentes posibilidades para una superficie (S) y ancho de banda total (B_T) dados
 - Incrementar K: añadir más canales, reduciendo el ancho de banda por canal
 - Aumentar N_C: disminuyendo el tamaño por célula
 - Disminuir N (factor de reuso)
 - Reducir el requerimiento de C/I mínimo necesario (modulaciones digitales)
 - Emplear antenas directivas (sectorización)

- Eficiencia

$$\eta_c = \frac{K/N}{S/N_C} \frac{1}{B_T} = \frac{K}{S} \frac{1}{B_T} \frac{N_C}{N} = \eta \frac{N_C}{N}$$

[canales / km²·Hz]

- K: # de canales (B_T/B_R)
- S: Superficie
- B_T: Ancho de banda total
- B_R: Ancho de banda de cada canal
- N: factor de reuso
- N_C: # total de células

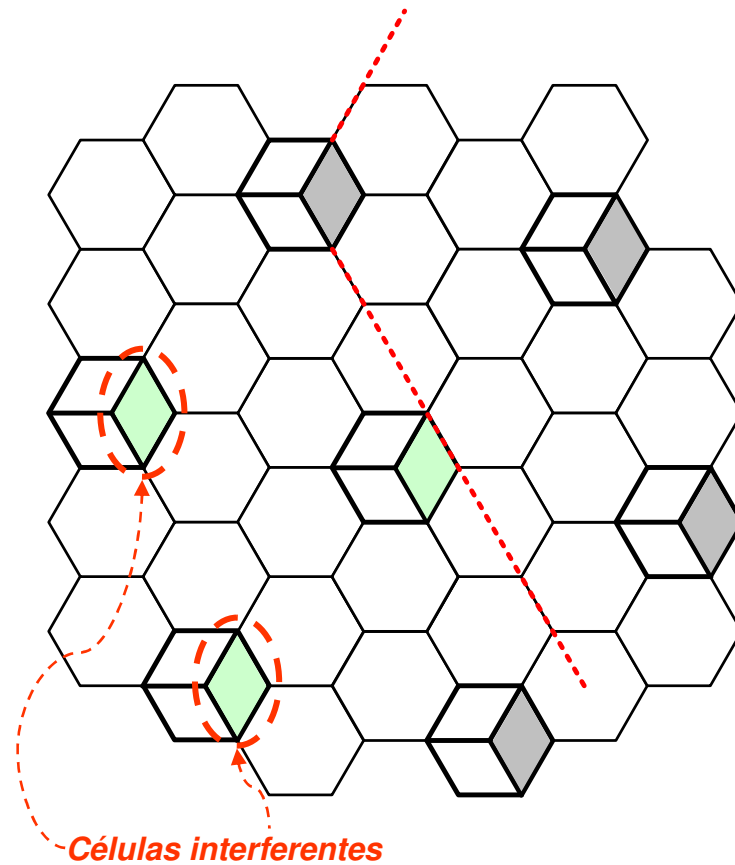
Sectorización

- Esta técnica se emplea desde los primeros despliegues de sistemas de telefonía celular
- Consiste en emplear antenas directivas en lugar de omnidireccionales, con lo que se consigue reducir la C/I (hay menos señales interferentes)
- Las configuraciones más habituales son sectorización a 120° y a 60°
- Este método presenta ciertas desventajas
 - Se necesita un número mayor de antenas por estación base
 - Al reducir el tamaño 'real' de las células, incrementa el número de handovers
 - Hay sistemas que consiguen reducir la penalización de los trasposos entre dos sectores de una misma BS
 - Al reducirse el número de recursos por célula, disminuye la eficiencia (desde el punto de vista de los operadores)
- Sistemas reales
 - Analógicos (C/I > 18 dB): N = 12 ó N = 7 con sectorización a 120°
 - Digitales, GSM (C/I > 11 dB): N = 4/3 y sectorización a 120°

Sectorización

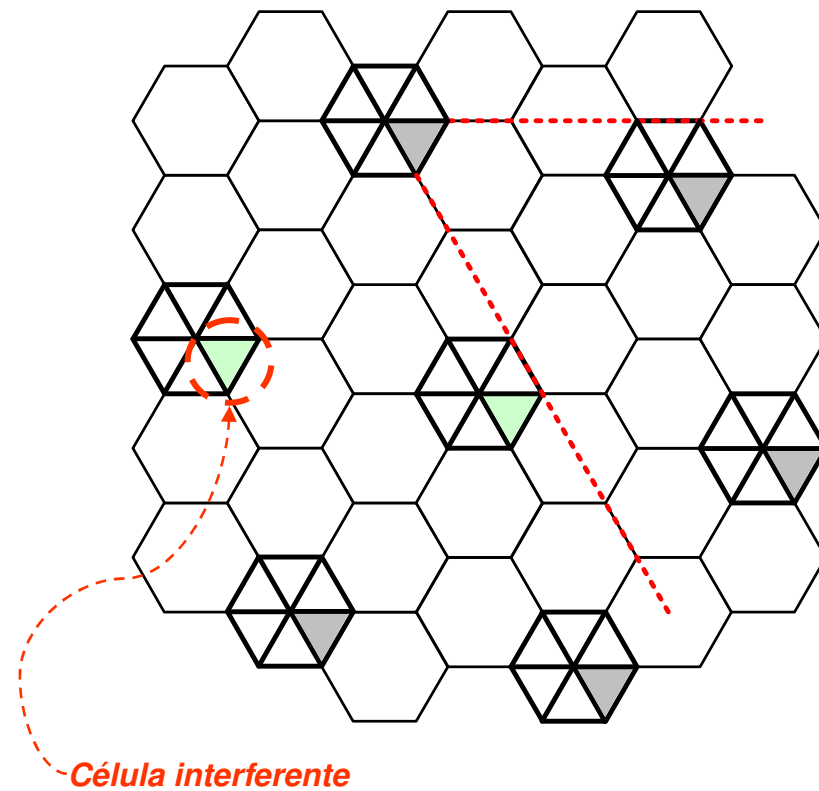
- Sectorización a 120°

- Hay dos BS interferentes

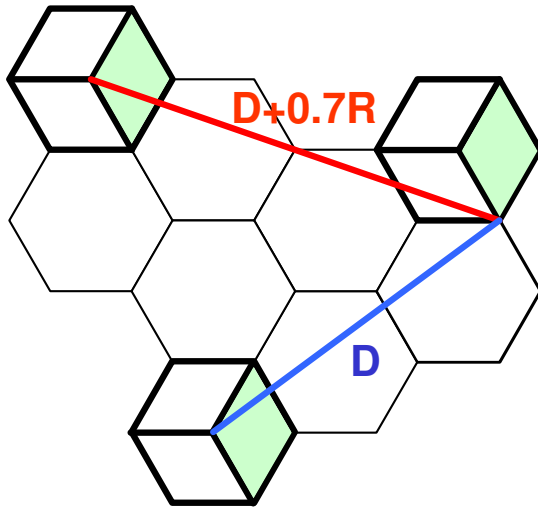


- Sectorización a 60°

- Sólo hay una BS interferente



Sectorización a 120°



- Distancias de las BS interferentes: aproximadamente D y $D + 0.7R$ ⁽²⁾
 - En (1) Lee asume que las dos BS están a distancia $D + R/2$

(1) William C. Y. Lee, "Elements of Cellular Mobile Radio Systems" IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol VT-35, no 2. Mayo 1986

(2) Dharma P. Agrawal, Qing-An Zeng. "Introduction to Wireless and Mobile Systems" Thomson Brooks/Cole

- Las dos BS interferentes están a D :

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{2} \left(\frac{D}{R} \right)^\gamma = \frac{1}{2} Q^\gamma = \frac{1}{2} (\sqrt{3N})^\gamma$$

- Peor caso (BS interferentes están a $D-R$):

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{2} \left(\frac{D-R}{R} \right)^\gamma = \frac{1}{2} (Q-1)^\gamma = \frac{1}{2} (\sqrt{3N}-1)^\gamma$$

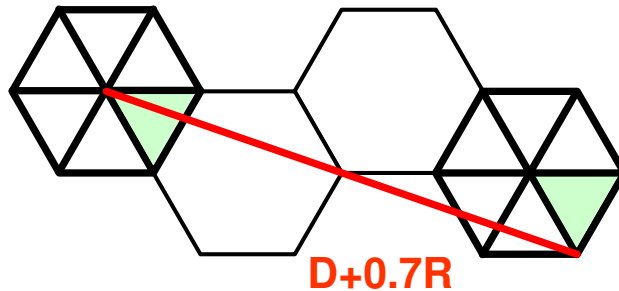
- Fórmula de Lee inicial⁽¹⁾:

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{2} (Q+0.5)^\gamma = \frac{1}{2} (\sqrt{3N}+0.5)^\gamma$$

- Fórmula de Lee mejorada (figura):

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{(Q+0.7)^{-\gamma} + Q^{-\gamma}}$$

Sectorización a 60º



- Distancia aproximada de la única BS interferente: $D + 0.7R^{(1)}$

- La BS interferente está a distancia D:

$$\frac{C}{I} = \left(\frac{D}{R}\right)^\gamma = Q^\gamma = (\sqrt{3N})^\gamma$$

- Peor caso (BS interferente a D-R):

$$\frac{C}{I} = \left(\frac{D-R}{R}\right)^\gamma = (Q-1)^\gamma = (\sqrt{3N}-1)^\gamma$$

- Fórmula de Lee⁽¹⁾:

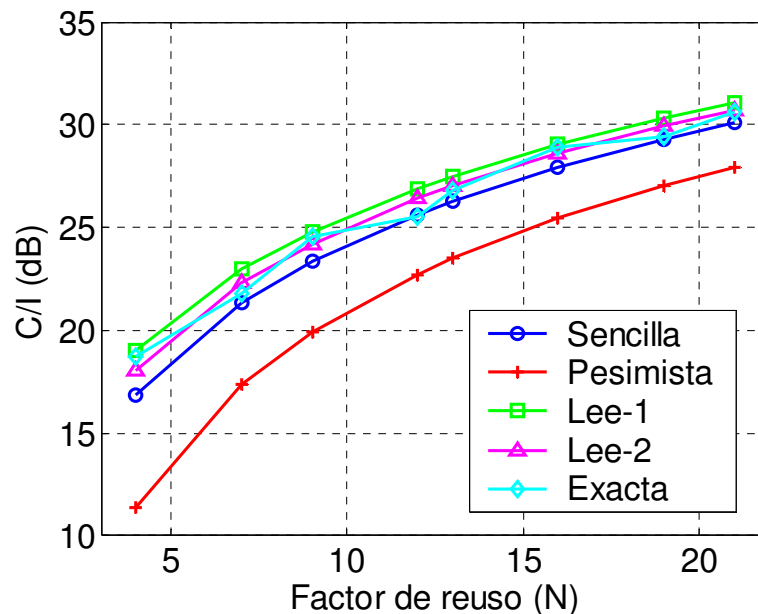
$$\frac{C}{I} = (Q+0.7)^\gamma = (\sqrt{3N}+0.5)^\gamma$$

(1) William C. Y. Lee, "Elements of Cellular Mobile Radio Systems" IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol VT-35, no 2. Mayo 1986

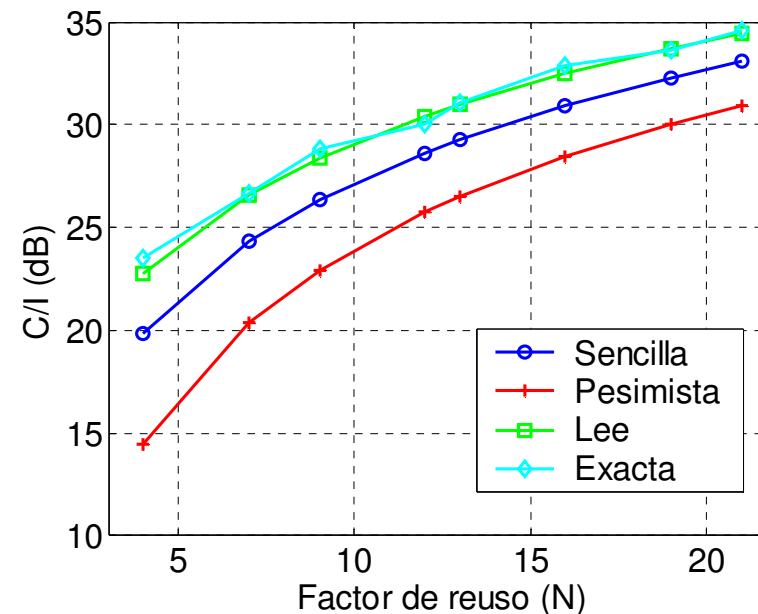
Sectorización

- Valores de C/I para $\gamma = 3.7$
 - El valor 'exacto' no tiene en cuenta la ganancia relativa de las antenas para los diferentes ángulos de incidencia
 - La aproximación de asumir que las BS interferentes están a la distancia de reuso parece razonable

Sectorización a 120°



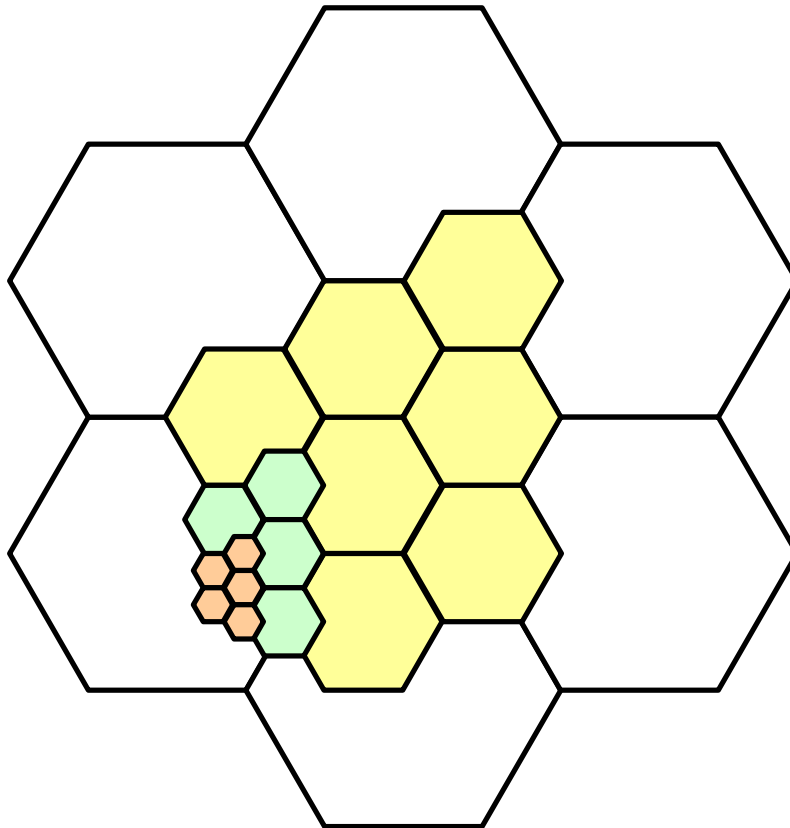
Sectorización a 60°



División celular (*Cell Splitting*)

- Se subdivide una célula congestionada en otras más pequeñas (*microcélulas*)
- No cambia la relación D/R
- Se necesita reducir la potencia de las nuevas células
 - A veces se modifica el patrón de radiación de las antenas: *downtilting*
- La división celular presenta el inconveniente de localizar nuevos emplazamientos
- Además complica la asignación de canales
- Se suele llevar a cabo una vez realizada la sectorización

Tipos de células



- **Macrocélula**
 - Radios entre 1.5 y 20 km
 - Zonas de baja densidad (rurales)
- **Minicélula**
 - Radios ente 0.5 y 1.5 km
 - Zonas de densidad media (núcleos urbanos de importancia media)
- **Microcélula**
 - Radios de 0.2 a 0.5 km
 - Zonas de densidad alta (núcleos urbanos)
- **Picocélula**
 - Radios < 250 m
 - Zonas interiores con gran densidad (aeropuertos, etc)