

# Redes de Comunicaciones

## Ejercicios Tema 4. Dimensionado de sistemas celulares



**Ramón Agüero Calvo**

Departamento de Ingeniería de Comunicaciones

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

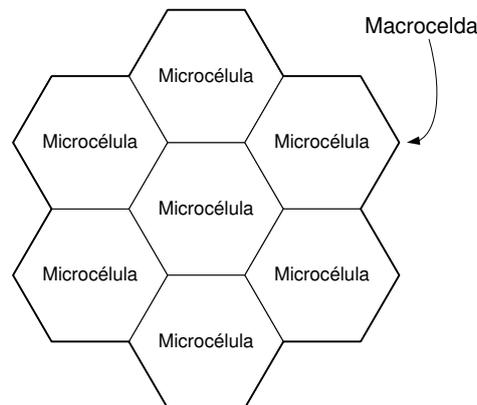


Tema 4 - Comunicaciones móviles  
Hoja de problemas

**Problema 1.** En un sistema de comunicaciones móviles se quiere dar servicio a los terminales transportados por viandantes y a los emplazados en los coches. Para evitar tener una cadencia de trasposos elevada, se dispone de dos tamaños de células, macrocélulas y microcélulas, asignando canales a los terminales según los siguientes criterios:

- Un terminal de coche ha de emplear siempre un canal de macrocélula.
- Un viandante ha de utilizar un canal de la microcélula, pero podrá hacer uso de la macrocélula en caso de que la microcélula donde está situado no tenga canales disponibles.

Una microcélula tiene un radio,  $R$ , de 200 m y una macrocélula está constituida por 7 microcélulas.



Sabiendo que:

- Densidad de viandantes que transportan un terminal: 200 viandantes/ $\text{Km}^2$
- Densidad de coches que disponen de un terminal: 500 coches/ $\text{Km}^2$
- Tráfico por terminal de viandante: 0.025 Erlangs.
- Tráfico por terminal de coche: 0.05 Erlangs.

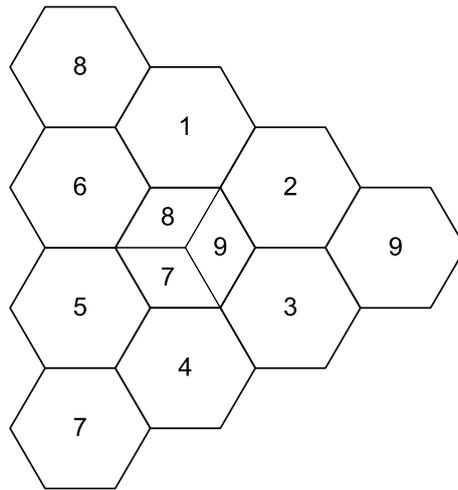
Se pide dimensionar el número de canales en un microcelda y en una macrocelda para que:

- (a) La probabilidad de que una llamada no pueda establecerse por falta de canal en la microcélula sea inferior a 0.1.

- (b) La probabilidad de que una llamada no pueda establecerse por falta de canal en la macrocélula sea inferior a 0.02.

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

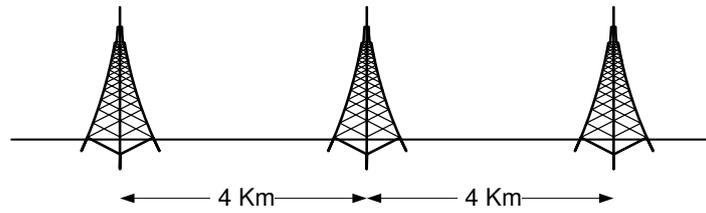
**Problema 2.** Se ha planificado un sistema de telefonía móvil celular para proporcionar servicio al área que se representa en la figura, asignando los grupo de canales indicados.



La densidad de usuarios es de  $d_1 = 7.7$  usuarios/ $\text{Km}^2$  en todas las células excepto en el núcleo central que es de  $d_2 = 2.5d_1$  usuarios/ $\text{Km}^2$ . Dado que en este núcleo la densidad es más grande, se han ubicado antenas sectoriales, cada una de las cuales cubre la tercera parte del área total del núcleo. El tráfico por usuario es 0.05 Erlangs y el factor de pérdidas de propagación es  $\gamma = 4$ .

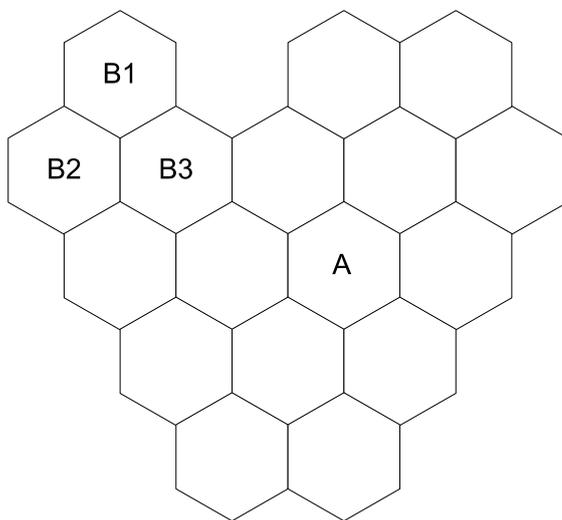
- Calcular el radio de la célula para que, asignando 4 canales por célula, la  $PB$  sea inferior al 2%.
- Calcular la relación  $C/I$ .
- Indicar cómo se reasignarían las frecuencias en el núcleo central a fin de mejorar la interferencia cocanal.
- Con la nueva asignación, calcular la interferencia cocanal.
- Con la nueva asignación, además de una mejora de relación  $C/I$ , ¿qué beneficio adicional se ha conseguido?

**Problema 3.** Se desea instalar un sistema de telefonía móvil celular en una carretera de trazado rectilíneo para lo cual se pretende emplear antenas direccionales que radien en los dos sentidos. La distancia entre las posiciones de las antenas es de 4 Km.



- Admitiendo que el factor de pérdidas es  $\gamma = 3$ , determinar el número de células por cluster si se desea tener un  $C/I > 15$  dB. En el cálculo considerar únicamente las dos interferencias más próximas.
- Si el tráfico por terminal es de 0.05 Erlangs, asumiendo que el 10 % de los automóviles llevan un terminal y que la densidad de vehículos en situación normal es de 40 vehículos por Km, determinar cuántos circuitos son necesarios para proporcionar un servicio con una probabilidad de bloqueo inferior al 2 %.
- Determinar cuántas frecuencias son necesarias para dar servicio al sistema.
- ¿Cómo se asignaría las frecuencias a cada célula?

**Problema 4.** Supongamos que un área se tesela hexagonalmente con células de radio  $R = 1$  Km y que dichas células se agrupan en un cluster de 3, tal como se indica en el dibujo.



- B1: Grupo de canales 1
- B2: Grupo de canales 2
- B3: Grupo de canales 3

- La densidad de habitantes de la zona es  $d = 70$  habitantes/Km<sup>2</sup>, siendo el factor de penetración del 40 %.
- El tráfico por usuarios de de 0.1 Erlangs y el factor de propagación es  $\gamma = 4$ .

- Se dispone de 1 MHz de ancho de banda total para los canales de subida y 1 MHz de ancho de banda total para los canales de bajada, con anchura de banda por canal de 25 KHz.
  - Para el cálculo de la relación  $C/I$  considerar las señales interferentes a distancia de reuso  $D$ .
- (a) De cuántos clusters completos se dispone. A cuántos usuarios más se podría dar cobertura si se reutilizan todas las frecuencias el mismo número de veces.
- (b) Calcular la probabilidad de bloqueo de una célula.
- (c) Calcular la relación  $C/I$  para la célula  $A$ .

Por razones de mercado se ha decidido empeorar el Grado de Servicio y mejorar la calidad de la conversación. Para ello, se ha planteado incrementar la  $C/I$  del apartado anterior en 3 dB.

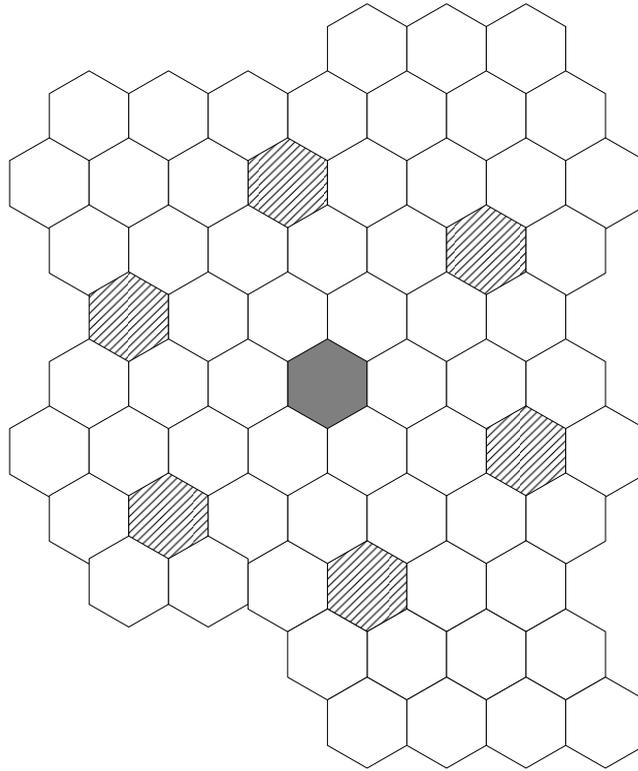
- (d) Calcular el tamaño mínimo del cluster necesario.  
*Nota: La célula indicada con B1 siempre pertenece a un cluster completo*
- (e) Calcular la nueva probabilidad de bloqueo.

**Problema 5.** Se quiere diseñar un sistema de comunicaciones móviles que proporcione cobertura a una zona rural en la que habrá una densidad de abonados de  $d = 6$  abonados/ $\text{Km}^2$  con un tráfico por terminal de 0.05 Erlangs. Se considera una geometría celular hexagonal donde cada célula tiene un área de  $20 \text{ Km}^2$ . En el cálculo de la relación  $C/I$  se tiene en cuenta únicamente la primera corona interferente y se supone que todas las estaciones base interferentes se encuentran a la distancia de reuso,  $D$ , del punto de cálculo de la relación  $C/I$ . El coeficiente de pérdidas de propagación es  $\gamma = 4$ .

Si se requiere  $C/I > 18$  dB, calcular:

- (a) El tamaño del cluster,  $N$ , necesario.
- (b) El número de canales por estación base necesario para dar un grado de servicio del 2%.

Para aumentar el número de abonados a los que se dará servicio, se propone usar antenas directivas de tres sectores, en lugar de emplear antenas omnidireccionales. Ello implica que cada célula se divide en tres sectores utilizando 3 antenas directivas en cada estación base. A cada sector, y por tanto en cada antena, se le asigna en exclusiva un grupo de frecuencias diferentes (la tercera parte de las que se asignarían a una antena omnidireccional).



- (c) Considerando el mismo valor del cluster que el calculado en el apartado 1, calcular la relación  $C/I$  del sistema si se hace uso de estaciones base trisectoriales.
- (d) Si el requerimiento es que  $C/I > 18$  dB, cuál es el valor mínimo del cluster que se podría utilizar.
- (e) Con el nuevo valor de cluster obtenido en el apartado anterior y con el mismo número total de frecuencias que en el primer diseño (es decir, con antenas omnidireccionales), calcular a qué densidad de abonados podría dar servicio el sistema, conservando el mismo grado de servicio.

**Problema 6.** En un sistema de comunicaciones móviles que cubre una autopista se emplean antenas **bidireccionales** (antenas que radian en los dos sentidos). Suponiendo que la mínima relación señal útil a interferencia es de 20 dB y que el coeficiente de pérdidas de propagación es de 2.5, se pide:

- (a) Calcular el tamaño del cluster,  $N$ , considerando las dos primeras interferencias.

Considerando que el tamaño de una célula es de 5 Km, la densidad de vehículos de 500 vehículos/Km, la probabilidad de que un vehículo tenga terminal móvil igual a 0.1 y el tráfico ofrecido por terminal móvil 0.05 Erlangs,

- (b) Calcular el número de circuitos necesarios para tener un grado de servicio mejor que el 2%.
- (c) Determinar el número de frecuencias necesarias para el sistema.
- (d) Para el mismo entorno, determinar el número de frecuencias necesarias en el caso que las antenas sean unidireccionales (antenas que radian en un único sentido) y considerando exclusivamente el primer emplazamiento interferente.
- (e) Para el mismo entorno determinar el número de frecuencias necesarias en el caso en que las antenas sean unidireccionales pero considerando dos emplazamientos interferentes.

**Problema 7.** Sea un sistema de comunicaciones móviles que cubre una autopista con antenas unidireccionales (antenas que radian en un solo sentido) separadas 1 Km entre ellas. Si la relación  $C/I$  mínima debe ser de 20 dB (considerar únicamente la contribución de la primera 'corona') y las pérdidas de propagación varían con el cubo de la distancia ( $\gamma = 3$ ), determinar:

- (a) Número de células por cluster.

Suponiendo que la densidad lineal de usuarios es de 30 abonados/Km y por sentido de circulación, el tráfico por terminal es de 0,05 Erlangs, calcular:

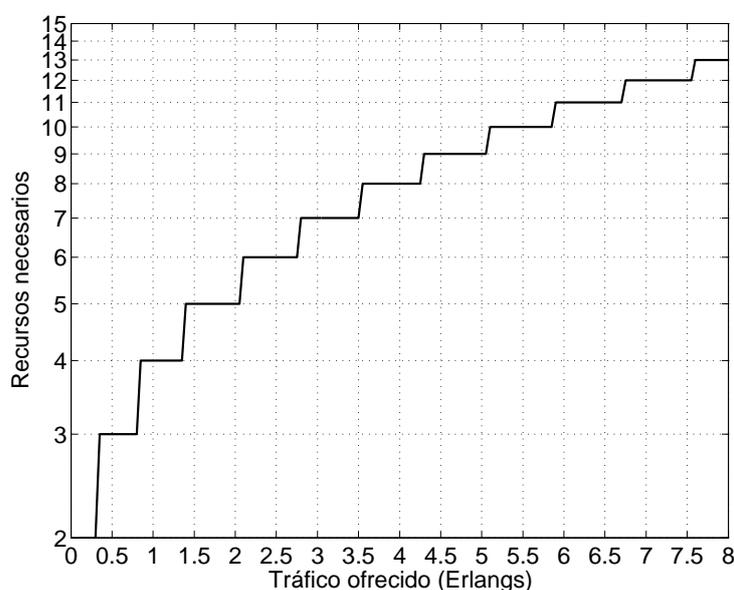
- (b) Número total de canales necesarios para obtener un grado de servicio del 2%.
- (c) Número total de frecuencias.
- (d) Proporcionar una asignación de frecuencias.

**Problema 8.** Una compañía de comunicaciones móviles pretende diseñar una red celular para dar servicio en una zona con una densidad de usuarios de  $\alpha$  usuarios/km<sup>2</sup>. Para ello dispone de antenas omnidireccionales con una cobertura de  $R$  m. Asumiendo una teselación hexagonal, se pide:

- (a) Calcular el factor de reuso máximo para alcanzar un grado de servicio del 4%, teniendo en cuenta que el ancho de banda total que dispone la operadora es de 1.68 + 1.68 Mbps (ascendente + descendente) y que cada canal ocupa 20 kbps. Asumir que  $\alpha = 18$  usuarios/km<sup>2</sup>, que el tráfico medio por usuario es de 0.06 Erlangs y que  $R = 1.4$  km.
- (b) Los terminales que dicha compañía ofrece a sus usuarios necesitan una  $C/I$  mínima de 14 dB ¿Se cubre dicho objetivo con la configuración derivada en el apartado anterior? Asumir que el exponente de pérdidas de propagación es  $\gamma = 3$ .

- (c) Para incrementar la calidad de la señal se decide emplear sectorización, utilizando antenas que emiten un haz de un ángulo de  $180^\circ$ . Calcular la nueva  $C/I$  en el sistema ¿Se logra alcanzar el valor objetivo?
- (d) Se supone ahora que las antenas del apartado anterior no son ideales, y que radían cierta señal espúrea en el semiplano opuesto ( $\sigma$  veces lo emitido en el haz de interés); se pide calcular la nueva  $C/I$  en función de  $\sigma$ . ¿Cuál es el valor máximo de  $\sigma$  que permite llegar a alcanzar la  $C/I$  objetivo?

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



Curva de *Erlang-B* para una pérdida del 4%

**Problema 9.** Un operador de comunicaciones móviles cuenta con  $[24 + 24]$  canales (*ascendentes + descendentes*) para dar servicio a sus usuarios a lo largo de una autopista. Además, dispone de antenas *unidireccionales* con un alcance de  $L = 4$  km (longitud de celda) que emiten cierta potencia (no deseada) en el sentido contrario (15%). Teniendo en cuenta que los móviles requieren de una  $C/I$  mínima de 15 dB, se pide:

- (a) Calcular el factor de re-uso ( $N$ ), asumiendo que el exponente de pérdidas de propagación es  $\gamma = 3$ . Para el cálculo de la interferencia, considerar únicamente las antenas a una distancia menor de  $2(N - 1)L$ .
- (b) La compañía dispone de la siguiente información:
- Densidad de vehículos:  $\alpha = 7.5$  coches/km
  - Móviles por coche:  $\beta = 4/3$  teléfonos/coche
  - Tráfico por terminal:  $\rho = 0.05$  Erlangs

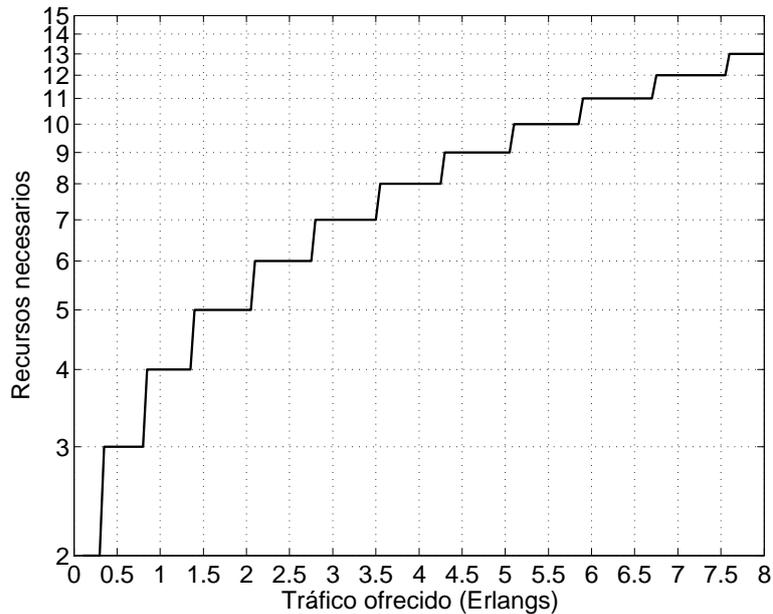
- ¿Es capaz de ofrecer un  $GoS$  del 98% con la configuración calculada previamente?
- (c) Durante la época de vacaciones, la densidad de vehículos aumenta a  $\alpha = 9$  coches/km, mientras que el número de móviles por coche ( $\beta$ ) crece a  $5/3$  (se mantiene el tráfico generado por terminal) ¿Se puede mantener la calidad del servicio para la nueva demanda con la configuración establecida previamente?
- (d) Para incrementar el  $GoS$  sin aumentar el número de frecuencias, la empresa plantea modificar las antenas, para que emitan en ambos sentidos (*bidireccionales*), manteniendo la misma longitud de la célula. Calcular el nuevo número de celdas por cluster. ¿Se alcanza ahora el  $GoS$  objetivo?
- Nota:* En este caso no es necesario considerar emisiones espurias.

**Problema 10.** Un operador de comunicaciones móviles cuenta con  $[24 + 24]$  canales (*ascendentes + descendentes*) para dar servicio a sus usuarios a lo largo de una autopista. Además, dispone de antenas *unidireccionales* con un alcance de  $L = 4$  km (longitud de celda):

- (a) Si se sabe que los teléfonos móviles requieren de una  $C/I$  mínima de 15 dB, calcular el factor de re-uso ( $N$ ), asumiendo que el exponente de pérdidas de propagación es  $\gamma = 3$ . Para el cálculo de la interferencia, considerar únicamente las antenas a una distancia menor de  $2(N - 1)L$  (aquellas que están en la primera corona).
- (b) A la hora de adquirir las antenas, el fabricante le advierte que éstas emiten cierta potencia *espuria* (no deseada) en el sentido contrario al del haz principal. ¿Cuál es el máximo porcentaje  $\sigma$  asociado a dicha radiación para que se pueda mantener el tamaño del cluster calculado previamente?
- (c) La compañía dispone de la siguiente información:
- Móviles por coche:  $\beta = 4/3$  teléfonos/coche
  - Tráfico por terminal:  $\rho = 0.05$  Erlangs

Calcular la densidad de coches ( $\alpha$ ) máxima a la que se podría dar servicio para mantener un  $GoS$  del 96%.

- (d) Durante la época de vacaciones, la densidad de vehículos aumenta a  $\alpha = 18$  coches/km, mientras que el número de móviles por coche ( $\beta$ ) crece a  $5/3$  (se mantiene el tráfico generado por terminal) ¿Se puede mantener la calidad del servicio para la nueva demanda con la configuración establecida previamente? ¿Cuántos canales adicionales necesitaría el operador para proporcionar el servicio con el mismo  $GoS$ ?

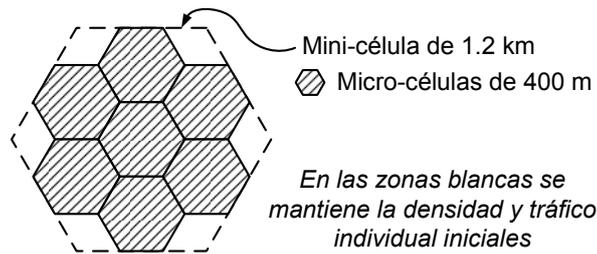


Curva de Erlang-B para una pérdida del 4%

**Problema 11.** Un operador de comunicaciones móviles tiene una capacidad total de 1.6 Mhz para dar servicio de telefonía en una zona rural (con este ancho de banda tiene que cubrir tanto los canales ascendentes como los descendentes). Para ello dispone de antenas omnidireccionales, con un alcance de 1.2 Km. Si se sabe que la anchura de un canal es de 20 Khz y que la densidad de usuarios es de  $\alpha = 20 \text{ habitantes/km}^2$ , se pide:

- Calcular el factor de re-uso máximo ( $N$ ), teniendo en cuenta que el tráfico por usuario se ha estimado en  $\rho = \frac{100}{3} \text{ miliErlangs}$ , y que se pretende alcanzar un  $GoS$  del 97%.
- Asumiendo que sólo hay interferencia co-canal y que se necesita una relación  $CIR$  mayor de 13 dB, ¿se podría utilizar la configuración calculada anteriormente? Aplicar un exponente de pérdidas de propagación  $\gamma = 4$ .  
*Considerar únicamente la primera corona para calcular la interferencia co-canal y que, además, todas las células interferentes se encuentran a la distancia de reuso.*
- Durante el despliegue de la red, los ingenieros se percatan que además de la co-canal, hay otras fuentes de interferencia que podrían afectar al comportamiento del sistema. Asumiendo que dicha interferencia adicional se puede expresar como un porcentaje de la co-canal, ¿cuál sería el valor máximo admisible para dicho porcentaje?

En un momento determinado se decide establecer un parque tecnológico en la zona. Se estima que la densidad de usuarios se incrementa hasta  $80 \text{ habitantes/km}^2$ , y que el tráfico individual crece hasta  $\rho = 60 \text{ miliErlangs}$ . La empresa se plantea incorporar un *cluster* adicional de 7 micro-células (con un radio de 400 m) para cubrir dicho área, como se muestra en la figura.



- (d) Calcular el número de canales que harían falta para mantener el  $GoS$  anterior, asumiendo que las llamadas en la zona cubierta por el *cluster* de micro-células serían atendidas únicamente por el nuevo despliegue de red.

La empresa pretende aprovechar la infraestructura de red inicial, para lo que plantea una segunda alternativa. En esta ocasión se utilizarán menos canales en el nuevo despliegue, pero las llamadas que no puedan ser atendidas por la micro-célula (primera elección) serían desbordadas a la mini-célula.

- (e) Dimensionar nuevamente el número de canales necesarios en el *cluster* de micro-células, teniendo en cuenta que la ocupación mínima requerida es del 50% para un canal cualquiera.  
*Suponer que la ocupación de canales es aleatoria.*
- (f) ¿Cuál es la nueva probabilidad de bloqueo en la zona cubierta por las 7 micro-células?  
*Asumir independencia entre las ocupaciones de las micro-células y la mini-célula y que el tráfico desbordado sigue una distribución de Poisson.*

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

**Problema 12.** Un operador de comunicaciones móviles pretende establecer una red a lo largo de una autopista. Para ello dispone de antenas *unidireccionales* con un alcance de  $L = 4$  km (longitud de celda). Teniendo en cuenta que los móviles requieren de una  $C/I$  mínima de 13 dB, se pide:

- (a) Calcular el factor de re-uso ( $N$ ) mínimo, asumiendo que el exponente de pérdidas de propagación es  $\gamma = 2.3$ . Para el cálculo de la interferencia, considerar la influencia de las dos primeras coronas interferentes.
- (b) La compañía dispone de la siguiente información:
- Densidad de vehículos:  $\alpha = 7.5$  coches/km
  - Móviles por coche:  $\beta = 4/3$  teléfonos/coche
  - Tráfico por terminal:  $\rho = 0.05$  Erlangs

Calcular el número de canales necesarios en el sistema para ofrecer un  $GoS$  del 98%.

- (c) Cuando la red comienza a operar, la compañía se percató de que las estimaciones iniciales de tráfico eran incorrectas y que realmente hay una densidad de  $\alpha =$

15 coches/km; calcular el número de canales necesarios para satisfacer dicha demanda.

La compañía se plantea otra alternativa para satisfacer la nueva demanda de tráfico. Adquiere un segundo conjunto de antenas, unidireccionales y con un alcance de  $2L$ . Dichas antenas se sitúan junto con las desplegadas inicialmente (utilizando los mástiles existentes que fueran necesarios). Cuando se produce una llamada, esta se atiende con las antenas de alcance  $L$  y, únicamente cuando no exista capacidad en éstas, se utilizaría el nuevo despliegue de red.

- (d) Calcular el número de canales que serían necesarios en el subsistema de antenas de primera opción, para que la ocupación mínima de cada uno de ellos (se supone aleatoria) sea del 75 %.
- (e) Asumiendo independencia, calcular la probabilidad de bloqueo máxima de una célula del segundo subsistema para alcanzar el *GoS* anterior.
- (f) Teniendo en cuenta que para el cálculo de la interferencia en el subsistema de las nuevas antenas sólo es necesario considerar la primera corona interferente, obtener el número total de canales necesarios con esta configuración, contando los dos subsistemas existentes.

*Asumir que los dos tipos de antena no se interfieren entre ellas.*

**Problema 13.** Un operador de comunicaciones móviles (operador **A**) pretende instalar una red para dar servicio a lo largo de una autopista. Para ello dispone de antenas *bidireccionales*, con un alcance de 1.5 Km en cada sentido. La empresa maneja los siguientes datos para estimar la demanda de tráfico.

- Densidad de coches:  $\alpha = 20$  coches/Km
- Móviles por coche:  $\beta = 4/3$  teléfonos/coche
- Tráfico por terminal:  $\rho = 0.05$  Erlangs

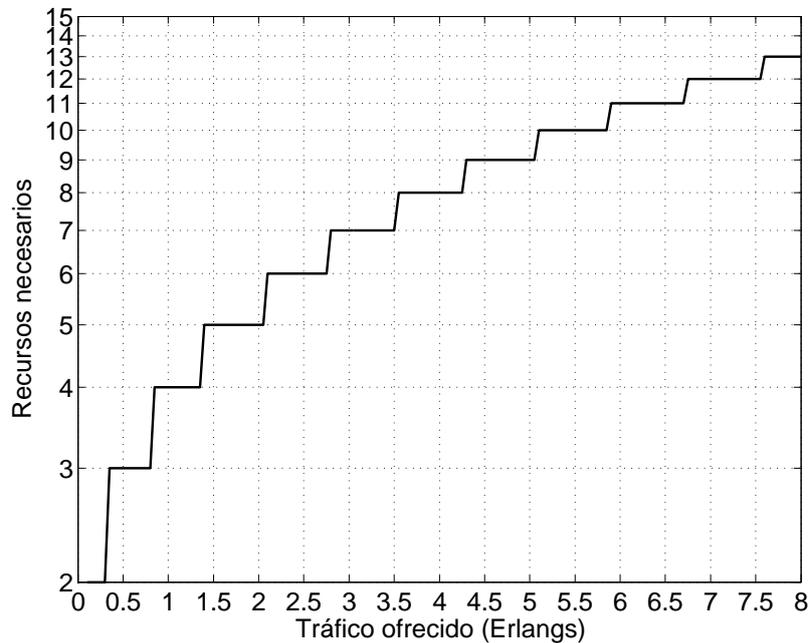
Se necesita garantizar una relación *CIR* de 12 dB para que la calidad de las conversaciones sea aceptable y se sabe que el exponente de pérdidas de propagación es  $\gamma = 2.3$ .

- (a) Si se pretende alcanzar un *GoS* del 4 %, ¿cuántos canales necesitará el operador?

A los pocos meses de explotación, aparece un operador incumbente (**B**), que establece su propia estructura de red. Se estima que dicha infraestructura podría llegar a generar una interferencia adicional de 3 dB sobre la del operador **A**.

- (b) ¿Cuál es el porcentaje mínimo de usuarios que tendrían que cambiarse al operador **B** para que el operador **A** no tuviera que adquirir mayor capacidad, manteniendo la misma calidad de servicio?

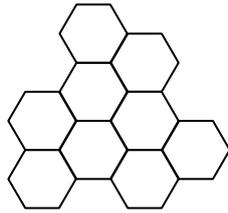
Para el cálculo de la interferencia co-canal, considerar únicamente la primera corona interferente.



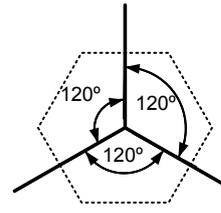
Curva de Erlang-B para una pérdida del 4%

**Problema 14.** Un operador de comunicaciones móviles tiene una capacidad total de 60 canales para dar servicio de telefonía en una zona rural (con ellos tiene que cubrir tanto el tráfico ascendente como el descendente). Para ello dispone de antenas omnidireccionales, con un alcance de 1.2 Km y se sabe que la densidad de usuarios es de  $\alpha = 24 \text{ habitantes/km}^2$ . A la hora de desplegar las estaciones base, el operador establece la configuración que aparece en la figura, con la que cubre todo el área de interés.

- Calcular el factor de re-uso máximo, asumiendo que el tráfico por usuario se ha estimado en  $\rho = 50 \text{ miliErlangs}$ , y que se pretende alcanzar un *GoS* del 98%.
- Asumiendo que sólo hay interferencia co-canal y que se necesita una relación *CIR* mayor de 11 dB, ¿se podría utilizar la configuración calculada anteriormente? Aplicar un exponente de pérdidas de propagación  $\gamma = 3$ .  
*Considerar que las células interferentes se encuentran a la distancia de reuso.*
- Para tener mayor margen en la *CIR*, el operador se plantea llegar hasta los 12 dB, para lo que pretende utilizar una sectorización a  $120^\circ$ , utilizando un diagrama de radiación como el mostrado en la figura. ¿Qué ganancia se obtiene en términos de *CIR*? ¿Qué inconveniente plantea esta solución?
- ¿Habría alguna alternativa adicional para llegar a los 12 dB? Comentar sus ventajas y desventajas.

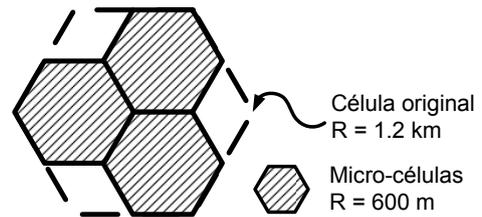


Despliegue inicial de la red



Sectorización a 120°: diagrama de radiación

Para potenciar el turismo en la zona, se abre un complejo residencial en un área que coincide con una de las celdas establecidas por el operador (*asumir que se usa el despliegue del apartado (a)*). Como consecuencia, se incrementa la densidad de usuarios (en toda la superficie de la celda original) hasta los  $\alpha = 42 \text{ habitantes/km}^2$ . La empresa se plantea incorporar un *cluster* adicional de 3 micro-células (con un radio de 600 m) para satisfacer la mayor demanda, tal y como se muestra en la figura.



Así, las llamadas en el complejo serán atendidas por el nuevo despliegue de red y, en caso de que no tuviera recursos, se desbordarían al sistema original.

- (e) ¿Cuántos canales son necesarios en el *cluster* de micro-células, teniendo en cuenta que la ocupación mínima requerida es del 55 % para un canal cualquiera?  
*Suponer que la ocupación de canales es aleatoria.*
- (f) Calcular la probabilidad de bloqueo en la zona cubierta por las 3 micro-células.  
*Asumir independencia entre las ocupaciones de las micro-células y la célula original y que el tráfico desbordado sigue una distribución de Poisson.*

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

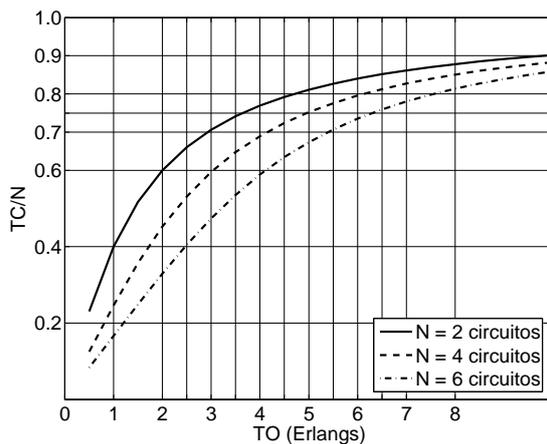
**Problema 15.** Un operador de comunicaciones móviles quiere desplegar una red de telefonía en una zona rural, que se supone de tamaño lo suficientemente extenso. Para ello dispone de antenas omnidireccionales, con un alcance de 1.2 Km, y estima una densidad de usuarios inicial de  $\alpha = 22.4 \text{ habitantes/km}^2$ .

- (a) Si el tráfico por usuario es  $\rho = 50 \text{ miliErlangs}$ , y pretende alcanzar un *GoS* del 96 %, ¿cuál es la capacidad total (número de canales) que necesita? Se asume que sólo hay interferencia co-canal y que se requiere una relación *CIR* mayor de 11 dB.  
*Considerar que las células interferentes se encuentran a la distancia de reuso. Aplicar un exponente de pérdidas de propagación  $\gamma = 4$ .*
- (b) A la hora de poner en marcha el sistema, los ingenieros se percatan de que debido a la presencia de otros operadores en la zona hay una interferencia adicional de 2 dB. ¿Se podría seguir empleando la configuración inicial? ¿Qué alternativa habría (para ofrecer el mismo grado de servicio) si se mantuvieran las antenas omnidireccionales?
- (c) Si la compañía pudiera utilizar antenas directivas de 180°, ¿cómo se podría satisfacer el grado de servicio requerido? Comparar las diferentes alternativas analizadas.

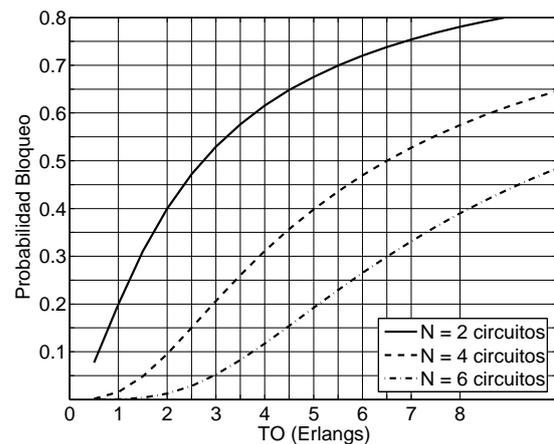
En las condiciones del apartado (b), el operador no puede disponer de la capacidad adicional necesaria, por lo que se tiene que plantear una alternativa diferente para garantizar un servicio adecuado a sus usuarios. Para ello contacta con un *Access Broker* para alquilar recursos. Teniendo en cuenta que el precio a pagar es elevado, el operador decide que las llamadas sean inicialmente atendidas por los canales alquilados y, cuando estén ocupados, se ofrezcan al despliegue propio y que, además, la ocupación mínima de un canal alquilado al *Access Broker* sea del 75 %.

- (d) Si el *Access Broker* ofrece grupos de canales de  $M \cdot [2 + 2]$  (ascendentes + descendentes), ¿cuántos grupos necesitará alquilar el operador por cluster?  
*Suponer que la ocupación de canales es aleatoria.*
- (e) Establecer el nuevo grado de servicio.  
*Asumir independencia entre las ocupaciones de las canales alquilados al Access Broker y el despliegue original de red y que el tráfico desbordado sigue una distribución de Poisson.*
- (f) Repetir los dos anteriores apartados si se produce, además, un incremento en la densidad de usuarios, que pasa a ser de  $\alpha = 32 \text{ habitantes/km}^2$ .

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



*Eficiencia en un sistema de pérdida pura con ocupación aleatoria*



*Probabilidad de bloqueo en un sistema de pérdida pura*

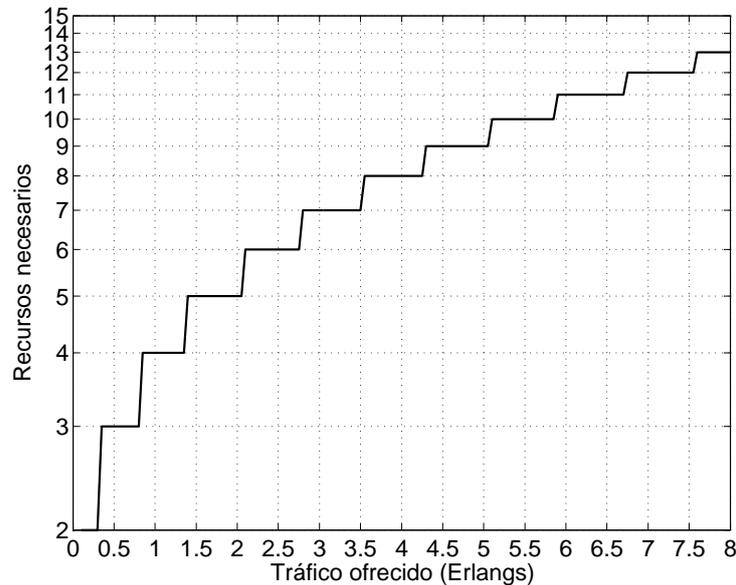
**Problema 16.** El operador de comunicaciones móviles **MoviliaSA** pretende instalar una red en una zona rural lo suficientemente extensa. Tiene antenas omnidireccionales, con un alcance de 1.2 Km, y adquiere una capacidad total de 100 canales - [50+50] (*ascendentes+descendentes*). Tras un análisis de mercado, la empresa estima los siguientes datos.

- Densidad de usuarios:  $\alpha = 20 \text{ habitantes/Km}^2$
  - Tráfico por usuario:  $\rho = 0.053 \text{ Erlangs}$
- (a) Si se pretende alcanzar un GoS del 4%, ¿cuál es el factor de reuso máximo que puede utilizar?
- (b) Debido a la gran cantidad de obra civil en la zona, es difícil establecer los parámetros del modelo de propagación. ¿Cuál es el valor mínimo del exponente de pérdidas ( $\gamma$ ) para que se

pueda emplear la configuración calculada en el apartado anterior, si se necesita que la *CIR* sea mayor de 13 dB? Para el cálculo de la interferencia co-canal, considerar únicamente la primera corona interferente y que las antenas interferentes están a la distancia de reuso.

A los pocos meses de explotación, aparece un operador de la competencia, que establece su propia estructura de red. Se estima que dicha infraestructura podría llegar a generar una interferencia adicional de 2 dB sobre la de **MoviliaSA**.

- (c) Establecer el factor de reuso mínimo en la red de **MoviliaSA** para mantener la *CIR* por encima de los 13 dB, utilizando un exponente de pérdidas  $\gamma = 4$ .
- (d) ¿Cuál es el porcentaje de usuarios mínimo que tendría que cambiarse al nuevo operador para que **MoviliaSA** mantuviera el *GoS* en el 4%?
- (e) ¿Podría utilizarse sectorización a  $120^\circ$ , manteniendo el factor de reuso del apartado (a), para garantizar el mismo *GoS*? Repetir el apartado (d) en este caso.

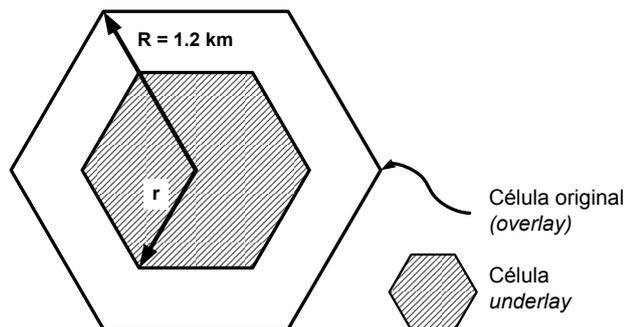


Curva de *Erlang-B* para una pérdida del 4%

**Problema 17.** Un operador de comunicaciones móviles tiene una capacidad total de 120 canales (60 para el tráfico ascendente y 60 para el descendente) para dar servicio de telefonía en una zona rural, disponiendo de antenas omnidireccionales con un alcance  $R = 1.2 \text{ km}$ .

- (a) Calcular el factor de re-uso mínimo, asumiendo que se necesita asegurar una *CIR* mayor de 11 dB y que el exponente de pérdidas de propagación se ha estimado en  $\gamma = 3.12$ . Considerar que las células interferentes se encuentran a la distancia de re-uso.
- (b) Si se estima que la densidad de población en la zona es de 21.33 habitantes/ $\text{km}^2$  y que el tráfico que genera cada usuario es de 50 *miliErlangs*, ¿se puede ofrecer un *GoS* del 98%?

La operadora se plantea la utilización de una técnica conocida como *underlay*. En ella, se establecen dos células a partir de la misma estación base (ver figura). Las llamadas se atenderán por una u otra célula, en función de la situación del usuario (*esto es, no hay desbordamiento*).



- (c) ¿Cuál es el radio máximo  $r_{\max}$  que puede tener la célula *underlay* si se pretende utilizar un factor de re-uso  $N = 3$  en ese despliegue?

*Se sigue considerando que la máxima CIR admisible es de 11 dB, el mismo exponente de pérdidas de propagación, y que todas las antenas interferentes están a la misma distancia, siendo ésta la que hay entre los emplazamientos de las estaciones base.*

- (d) ¿Cuántos canales son necesarios utilizar para el despliegue de células *underlay*, si se pretende que la probabilidad de bloqueo sea del 2% en ellas? ¿Cuál es la probabilidad de bloqueo resultante en las células *overlay*, teniendo en cuenta que el operador no adquiere más capacidad?

*Para este despliegue se mantiene el factor de re-uso calculado en el apartado (a).*

- (e) ¿Cuál es la probabilidad de bloqueo final?

*Calcular la probabilidad de que una llamada cualquiera se pierda, teniendo en cuenta que la densidad se considera constante en toda la zona.*

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

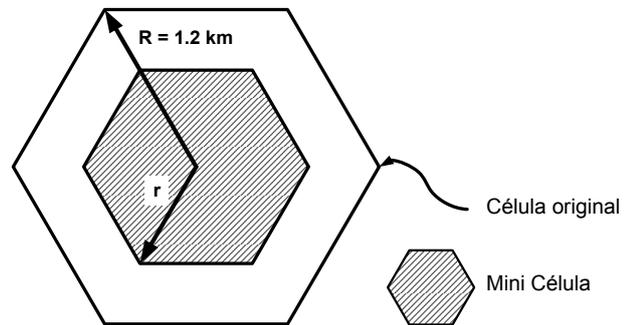
**Problema 18.** Un operador de comunicaciones móviles pretender diseñar una red para dar servicio de telefonía en una zona rural, disponiendo de antenas omnidireccionales con un alcance  $R = 1.2 \text{ km}$ .

- (a) Calcular el factor de re-uso mínimo, asumiendo que se necesita asegurar una *CIR* mayor de 11 dB y que el exponente de pérdidas de propagación se ha estimado en  $\gamma = 3.32$ .

*Considerar que las células interferentes se encuentran a la distancia de re-uso.*

- (b) Si se estima que la densidad de población en la zona es de 16 habitantes/ $\text{km}^2$  y que el tráfico que genera cada usuario es de 50 *miliErlangs*, ¿cuántos canales necesitaría adquirir el operador para ofrecer un *GoS* del 97%?

Debido a la instalación de una central de energía eólica en la zona, la densidad de usuarios en una de las células se incrementa hasta los 21.33 habitantes/km<sup>2</sup>. Para garantizar un grado de servicio adecuado en dicha zona la operadora se plantea la instalación de una célula adicional (*mini-célula*), cuya antena se despliega en la misma localización que una de las originales (ver figura).



- (c) Calcular el alcance máximo permitido para la nueva antena si se estima que la instalación de la mini-célula genera una interferencia adicional sobre el despliegue original que se puede aproximar (en *dB*) como  $I_{\text{adicional}} = 3.9r^2$ , donde  $r$  es el radio de la mini-célula en *km*.
- (d) La compañía decide utilizar una mini-célula con un alcance de  $r = 0.85 \text{ km}$ . En una primera configuración (*sin desbordamiento*) el tráfico en la zona cubierta por la mini-célula se reparte equitativamente entre ambas células, pero las llamadas que se pierden inicialmente no se desbordan. ¿Cuántos canales serían necesarios en la mini-célula para mantener el grado de servicio en el 97%?
- (e) El operador se plantea una solución alternativa, en la que todas las llamadas en la zona cubierta por la mini-célula sean ofrecidas inicialmente a ésta y, aquellas que no se puedan cursar, se desborden a la red original. Si se pretende que los canales de la mini-célula estén ocupados, al menos, el 60% del tiempo, ¿cuál es el número máximo de canales que se podrían poner en la mini-célula? Calcular la probabilidad de bloqueo en este caso.  
*Suponer que la ocupación de canales es aleatoria.*  
*Asumir independencia entre las ocupaciones de la mini-célula y el despliegue original y que el tráfico desbordado sigue una distribución de Poisson.*

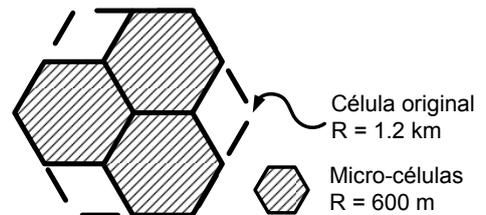
**Ayuda:**  $A_{\text{hexágono}} = \frac{3\sqrt{3}}{2}R^2$

**Problema 19.** El operador de comunicaciones móviles **YoListen** pretende instalar una red en una zona rural lo suficientemente extensa, para lo que dispone de antenas omnidireccionales, con un alcance de 1.2 *Km*. Teniendo en cuenta las previsiones de mercado que tiene a su disposición (se indican a continuación) adquiere una capacidad total de 60 canales - [30+30] (*ascendentes+descendentes*).

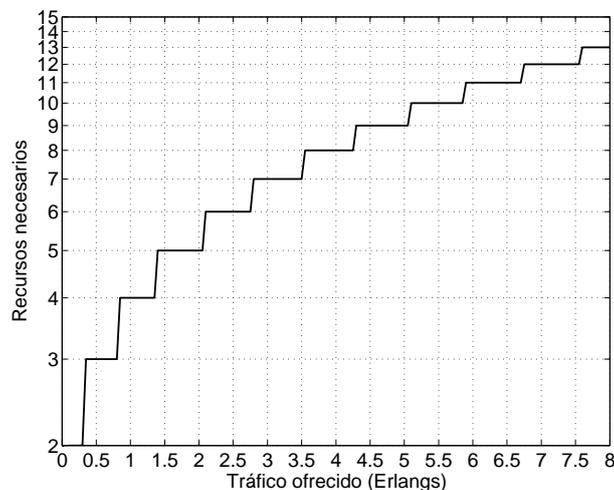
- Densidad de usuarios:  $\alpha = 12.5 \text{ habitantes/Km}^2$
  - Tráfico por usuario:  $\rho = 0.053 \text{ Erlangs}$
- (a) Si se pretende alcanzar un GoS del 4%, ¿cuál es el factor de reuso máximo que puede utilizar?
- (b) ¿Cuál es el requerimiento de CIR que **YoListen** debería fijar para seleccionar la tecnología a utilizar si se supone que el exponente de pérdidas de propagación es  $\gamma = 4$ ?  
*Para el cálculo de la interferencia co-canal, considerar únicamente la primera corona interferente y que las antenas interferentes están a la distancia de reuso.*

- (c) Teniendo en cuenta las características del terreno, los ingenieros establecen que la interferencia causada por la segunda corona interferente podría ser relevante. Si se supone que la distancia con las estaciones base de la  $j$ -ésima corona interferente se puede aproximar con  $D_j = j \cdot D$  (donde  $D$  es la distancia de reuso), ¿cuál es la interferencia adicional (en  $dB$ ) que generaría la 2ª corona interferente frente al resultado del apartado anterior? ¿Depende del valor del factor de reuso?

Debido a la construcción de un parque temático, se estima que la densidad de usuarios (en toda la superficie de una de las celdas) crece hasta  $\alpha = 30$  habitantes/ $Km^2$ . YoListen se plantea establecer una estructura de red adicional, utilizando 3 micro-células con un radio de 600 m, tal y como se muestra en la figura.



- (d) Los ingenieros radio estiman que dicha infraestructura podría llegar a generar una interferencia adicional sobre la original. ¿Cuál es el valor máximo de esta interferencia si la tecnología utilizada requiere una  $CIR$  de 12 dB?  
*Utilizar el resultado del apartado (b), esto es, con una única corona interferente.*
- (e) Las llamadas en la zona cubierta por las tres micro-células se atienden indistintamente por las dos alternativas de acceso (de manera completamente aleatoria), sin contemplar desbordamiento entre ellas. Si pretende mantener el  $GoS$  ¿cuántos canales necesitará adquirir YoListen para el nuevo despliegue?



Curva de *Erlang-B* para una pérdida del 4%

**Problema 20.** Una compañía de telecomunicaciones se plantea desplegar una red de comunicaciones móviles para dar servicio a lo largo de una carretera. Para ello dispone de antenas unidireccionales con un alcance de  $L = 3$  km. Tras un análisis de mercado, la compañía utiliza los siguientes datos para estimar la demanda de tráfico en el sistema.

- Densidad de coches:  $\alpha = 8.33$  coches/ $Km$ .

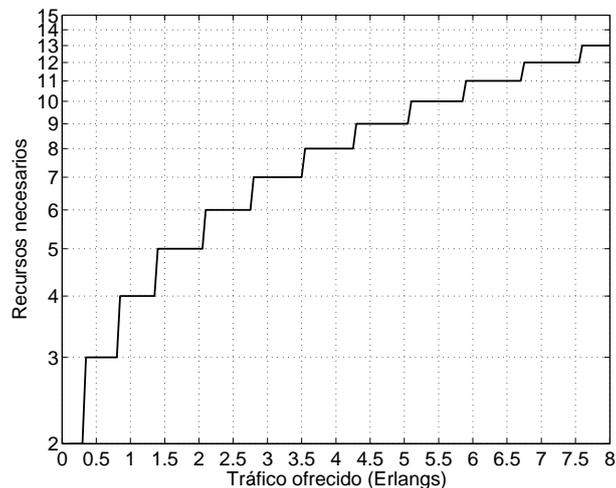
- Móviles por coche:  $\beta = 1.5$  teléfonos/coche.
- Tráfico por terminal:  $\rho = 0.08$  Erlangs.

Además, los ingenieros establecen que el exponente de pérdidas de propagación de la zona es  $\gamma = 3$ . Si la tecnología que se va a desplegar requiere una CIR mayor de 16 dB, se pide resolver razonadamente a las siguientes cuestiones.

- ¿Cuántos canales tendrá que adquirir la compañía si pretende ofrecer una calidad de servicio del 96% a sus clientes?  
Para el cálculo de la interferencia co-canal utilizar únicamente la interferencia causada por la primera corona.
- Los ingenieros se percatan de que la estimación del exponente de pérdidas de propagación no fue del todo correcta. ¿Qué error relativo pueden haber cometido para que no haya una disminución en el grado de servicio del sistema?

Para asegurar un correcto traspaso entre celdas, la compañía incrementa ligeramente el alcance de las antenas, manteniendo su posición original, de manera que haya cierto solapamiento entre las coberturas de dos celdas adyacentes.

- Si se expresa dicho aumento de manera relativa a la distancia entre antenas ( $\omega L$ ), ¿cuál es el valor máximo de  $\omega$  para mantener el mismo factor de reuso que el calculado anteriormente? Utilizar el valor de  $\gamma$  original ( $\gamma = 3$ ).
- ¿Se puede garantizar el correcto funcionamiento del traspaso si se requiere que el tiempo en el que un terminal tenga conectividad con las dos estaciones base sea 15 s y se estima que la velocidad de los coches es de 120 km/h?
- Si se asume que en las zonas de solapamiento el tráfico se reparte equitativamente entre las dos estaciones base, ¿será necesario que el operador adquiera mayor capacidad?



Curva de Erlang-B para una pérdida del 4%

**Problema 21.** La compañía de comunicaciones móviles **SAILing** pretende desplegar una red de comunicaciones móviles en un entorno rural lo suficientemente extenso. Para ello dispone

de antenas omnidireccionales con un alcance configurable  $R$ . Además, se sabe que la tecnología que ha adquirido necesita una CIR mayor de 13 dB, y se estiman los siguientes datos de mercado.

- Densidad de usuarios:  $\alpha = 12$  usuarios/km<sup>2</sup>.
  - Tráfico por usuario:  $\rho = 36$  mErlangs.
- (a) ¿Cuál es el factor de reuso mínimo que se puede emplear si se asume un exponente de pérdidas de propagación  $\gamma = 3.7$ ? ¿Depende del valor de  $R$ ?  
**Nota:** Asumir que las estaciones base interferentes se encuentran a la distancia de reuso y tener en cuenta únicamente la primera corona.
- (b) Si el operador adquiere 84 canales [42 + 42] (ascendentes + descendentes) para dar servicio en la zona, ¿cuál es la cobertura máxima  $R_{\max}$  que puede emplear para sus estaciones base si pretende ofrecer una calidad de servicio del 97% a sus clientes?

La apertura de un centro de ocio en la zona hace que **SAILing** se replantee el diseño inicial. La densidad de usuarios en un área cubierta por una de las estaciones base crece hasta  $\alpha = 19$  usuarios/km<sup>2</sup>, por lo que la compañía adquiere el equipamiento necesario para desplegar una picocélula, aprovechando la infraestructura (mástil) desplegada originalmente.

- (c) Si se estima que la picocélula introduce una interferencia adicional que se estima en (dB) como  $I_{\text{adicional}} = 6.54 \cdot r^2$ , cuál es la cobertura máxima que se puede emplear, para mantener el factor de reuso calculado en el apartado (a)?

**SAILing** se plantea dos alternativas de diseño, en función de la gestión de las llamadas que se realizan en la zona cubierta por la picocélula.

[Alternativa 1] Sólo se cursan por la picocélula.

[Alternativa 2] Se reparten equitativamente entre la picocélula y la célula original.

- (d) Si se adquieren 10 canales para la picocélula [5 + 5] (ascendentes + descendentes), calcular la calidad de servicio en la zona del centro de ocio, para las dos alternativas planteadas.  
**Nota:** Asumir que la zona del centro de ocio coincide exactamente con la cobertura de la célula original y utilizar, como cobertura de la picocélula, el valor obtenido en el apartado (c).

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

**Problema 22.** El operador de comunicaciones móviles **MONAtel** pretende dar servicio en una zona rural que se considera lo suficientemente extensa, para lo que cuenta con antenas omnidireccionales con un alcance de  $R = 1.1$  km. La tecnología que emplea requiere que la CIR sea superior a 12 dB.

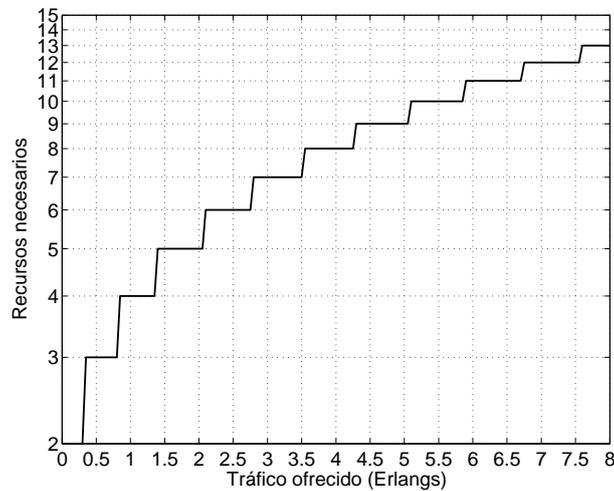
- (a) ¿Qué factor de reuso deberá utilizar **MONAtel**, si se ha estimado que el exponente de pérdidas de propagación es  $\gamma = 4$ ?  
 Para el cálculo de la interferencia co-canal, considerar únicamente la primera corona interferente y que las antenas interferentes están a la distancia de reuso.

- (b) ¿Cuántos canales necesita adquirir **MONAtel** para garantizar una  $QoS$  del 96 %, si se estima que la densidad de usuarios es de 17 usuarios/ $km^2$  y que cada uno genera un tráfico de 84 *miliErlangs*?

Tras varios meses de operación, se instala otro operador en la zona. Los ingenieros de **MONAtel** estiman que la infraestructura que despliega introduce una interferencia adicional de 3 *dB*.

- (c) Si **MONAtel** no puede adquirir más capacidad, ¿qué porcentaje de usuarios deberían pasarse a la competencia para que **MONAtel** pudiera seguir ofreciendo la misma calidad de servicio a sus clientes?

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



Curva de *Erlang-B* para una pérdida del 4 %

**Problema 23.** El operador de comunicaciones móviles **LEXTel** pretende dar servicio en una zona rural que se considera lo suficientemente extensa, para lo que cuenta con antenas omnidireccionales con un alcance de  $R = 1.1 \text{ km}$ . Además, dispone para el servicio de 56 canales [28 + 28] (*ascendentes + descendentes*).

- (a) ¿Qué factor de reuso deberá utilizar **LEXTel**, si la tecnología que emplea requiere una  $CIR$  mayor de 12 *dB* y se ha estimado que el exponente de pérdidas de propagación es  $\gamma = 4$ ? Para el cálculo de la interferencia co-canal, considerar únicamente la primera corona interferente y que las antenas interferentes están a la distancia de reuso.
- (b) ¿Cuál es la densidad máxima de usuarios a los que puede dar servicio, si se estima que cada uno de ellos genera un tráfico de 68 *miliErlangs* y **LEXTel** pretende ofrecer una  $QoS$  del 97 %?

Tras la puesta en marcha del sistema, se detecta que la densidad de usuarios en varias celdas ha incrementado (estacionalmente) hasta  $\alpha = 21 \text{ habitantes}/km^2$ . **LEXTel** pretende cubrir dicho

aumento en la demanda alquilando capacidad a otro operador que comparte su infraestructura (mismo emplazamiento de las estaciones base), y que únicamente le ofrece grupos de  $N \cdot [2 + 2]$  canales. Así, las llamadas generadas en dichas celdas serán atendidas inicialmente por dichos canales alquilados y, sólo si estuvieran ocupados, se ofrecerían al despliegue original.

- (c) Calcular el grado de servicio que ofrecerá **LEXTel** a los abonados de las celdas con mayor población si establece que la ocupación mínima (por canal) en los canales alquilados sea del 75%.

*La ocupación de los canales alquilados se supone aleatoria.*

*Asumir independencia entre las ocupaciones de las dos infraestructuras de red y que el tráfico desbordado sigue una distribución de Poisson.*

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

**Problema 24.** Un operador pretende desplegar una red de comunicaciones móviles en una zona rural. Para ello dispone de antenas omnidireccionales con un alcance de 1.2 Km y adquiere una capacidad total de  $[32 + 32]$  canales (*ascendentes + descendentes*). Los datos de mercado con los que cuenta son los que se enumeran seguidamente.

- Densidad de usuarios:  $\alpha = 15$  usuarios/km<sup>2</sup>.
- Tráfico por usuario:  $\rho = 35$  mErlangs.

- (a) ¿Cuál es el factor de reuso máximo que se puede emplear si se pretende ofrecer un *GoS* del 96% a los usuarios? ¿Qué probabilidad de bloqueo se obtiene finalmente?
- (b) La tecnología que se va a emplear requiere una *CIR* mínima de 11 dB. Los ingenieros de planificación radio desconocen el exponente de pérdidas de propagación que caracteriza el terreno, ¿cuál es el valor mínimo admisible para mantener el factor de reuso calculado previamente?

*Nota: Asumir que las estaciones base interferentes se encuentran a la distancia de reuso y tener en cuenta únicamente la primera corona.*

Debido a las características del terreno, el exponente de pérdidas es relativamente pequeño,  $\gamma = 3.1$ , por lo que la compañía se plantea dos alternativas para adaptar su red.

*Alternativa 1* Incrementar el factor de reuso.

*Alternativa 2* Utilizar sectorización de 120°.

- (c) ¿Qué factor de reuso debería utilizar el operador en la *Alternativa 1*? ¿Cuántos canales necesitaría para mantener el *GoS*?
- (d) ¿Es viable la *Alternativa 2* desde el punto de vista de la interferencia co-canal? ¿Cuántos canales necesitaría adquirir el operador?
- (e) ¿Con qué alternativa se quedaría el operador? ¿Cuál sería la interferencia adicional que podría soportar el sistema sin degradar la calidad de las comunicaciones?
- (f) Repetir el apartado (d) si la sectorización fuera de 180°.

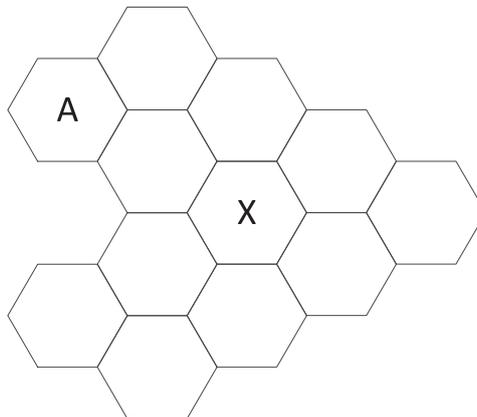
$$\text{Ayuda: } A_{\text{hexágono}} = \frac{3\sqrt{3}}{2} R^2$$

**Problema 25.** El operador de comunicaciones móviles **ClouT** quiere establecer una red celular en una zona rural, para lo que cuenta con antenas omnidireccionales con un alcance de  $R = 600 \text{ m}$ . Los ingenieros radio determinan la posición de las estaciones base que deben desplegar para cubrir el terreno, dando lugar a la topología que se muestra en la figura.

Por su parte, el departamento de planificación utiliza los siguientes datos para determinar la capacidad que **ClouT** adquiere para dar servicio en el área.

- Densidad de usuarios:  $\alpha = 14 \text{ usuarios/km}^2$ .
  - Tráfico por usuario:  $\rho = 60 \text{ mErlangs}$ .
- (a) ¿Cuál es el factor de reuso máximo que puede utilizar el operador, si dispone de 20 canales [10 + 10 - ascendentes + descendentes] para dar el servicio y pretende ofrecer un *GoS* del 96% a sus clientes?
- (b) Utilizando el factor de reuso calculado anteriormente, establecer la *CIR* del sistema en *dB*, suponiendo que el exponente de pérdidas de propagación es  $\gamma = 3.7$ .  
*Para el cálculo de la interferencia co-canal, considerar que las antenas interferentes están a la distancia de reuso y únicamente aquellas que pertenecen a la primera corona interferente. Utilizar para el cálculo la celda más penalizada por la interferencia co-canal y asumir que la celda 'A' pertenece a un cluster completo.*

Tras la puesta en marcha del sistema, se detecta que la densidad de usuarios del núcleo de la población (celda *X* y las seis que la rodean) es mayor del inicialmente previsto (se incrementa hasta  $\alpha = 17.8 \text{ usuarios/km}^2$ , por lo que **ClouT** decide desplegar una célula adicional (utilizando la misma estación base que la celda *X*), con una cobertura de  $1.2 \text{ Km}$ . El operador determina que el tráfico generado en el área cubierta por la nueva celda sea atendido, inicialmente, por ella y, solo si estuviera ocupada, se ofrecería a los recursos de la red original.



- (c) Calcular los canales que **ClouT** adquirirá para la nueva celda, si establece que la ocupación mínima de cada uno de ellos sea del 70%.  
*La ocupación de los canales se supone aleatoria.*
- (d) ¿Cuál es la probabilidad de bloqueo que tendría un usuario en la celda *X*? ¿Y en cualquiera de las otras 6 células del núcleo de la población? ¿Cuál es el *GoS* medio en el núcleo de la población?

*Asumir independencia entre las ocupaciones de las dos infraestructuras de red y que el tráfico desbordado sigue una distribución de Poisson.*

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

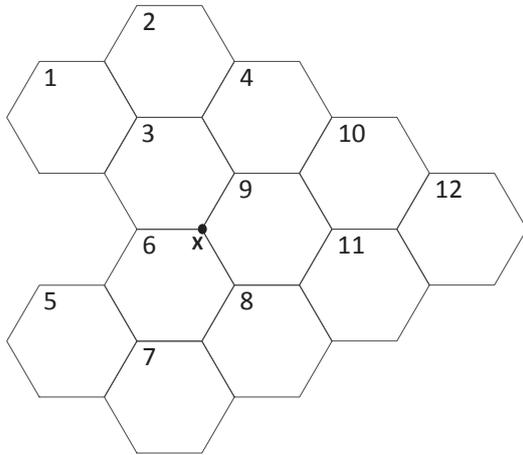
**Problema 26.** El operador de comunicaciones móviles **COSaif** quiere establecer una red celular en una zona rural, para lo que cuenta con antenas sectoriales ( $120^\circ$ ) con un alcance de  $R = 600 \text{ m}$ . El terreno en el que tiene que establecer la red se modela con geometría hexagonal tal y como se muestra en la Figura (1); las antenas se situarían en los centros de cada célula y se utilizaría el patrón de radiación que se indica (Figura (2)).

- (a) ¿Cuál es la *CIR* que habría en el sistema, si se pretende utilizar un factor de reuso  $N = 4$  y se ha estimado que el exponente de pérdidas de propagación es  $\gamma = 3.1$ ?  
*Para el cálculo de la interferencia co-canal, considerar que las antenas interferentes (sólo aquellas que están en la primera corona interferente) están a la distancia de reuso. Utilizar para el cálculo la celda más penalizada por la interferencia co-canal y considerar que las celdas [1, 2, 3, 4] pertenecen al mismo cluster.*
- (b) Si el operador adquiere [36 + 36] canales (ascendentes/descendentes) para dar el servicio, ¿cuál es la densidad máxima de clientes que **COSaif** podría soportar si se estima que el tráfico generado por cada usuario es de  $\rho = 60 \text{ mErlangs}$  y se pretende ofrecer un *GoS* del 98%?

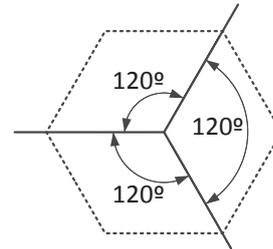
Tras la puesta en marcha del sistema, se construye un centro comercial en el área, coincidiendo con la cobertura de las celdas [3,4,6,8,9], en las que la densidad crece hasta  $\alpha = 46.6 \text{ habitantes/km}^2$ . Los ingenieros de **COSaif** se plantean instalar una célula adicional para hacer frente a la nueva demanda. Para ello se haría uso de una antena omnidireccional, con un alcance de  $1.2 \text{ km}$ , que situaría en el punto **X** de la figura. El operador determina que el tráfico generado en el área cubierta por la nueva celda sea atendido, inicialmente, por ella y, solo si estuviera ocupada, se ofrecería a los recursos de la red original.

- (c) Se estima que la instalación de la nueva infraestructura genera una interferencia adicional, que se estima en  $I_{\text{adicional}} \text{ (dB)} \approx 0.103k^2$ , donde  $k$  es el número de canales (únicamente descendentes) que se adquieren para la nueva estación base. Si la tecnología empleada requiere que la *CIR* sea superior a  $12 \text{ dB}$ , ¿cuál es el número máximo de canales que **COSaif** podría utilizar en la nueva célula? Para determinar la rentabilidad de la inversión, calcular el grado de ocupación de cada uno de los canales contratados, asumiendo que la ocupación de los mismos es aleatoria.
- (d) Determinar el *GoS* medio en el centro comercial, a partir de las probabilidades de bloqueo en las zonas correspondientes a las cinco celdas en las que se sitúa.  
*Asumir independencia entre las ocupaciones de las dos infraestructuras de red, y que el tráfico desbordado sigue una distribución de Poisson.*

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



**Figura (1)** Área de despliegue de la red



**Figura (2)** Patrón de radiación de las antenas sectoriales

**Problema 27.** Una compañía de telecomunicaciones se plantea desplegar una red de comunicaciones móviles para dar servicio en un área rural. Para ello dispone de antenas con un patrón de radiación de  $120^\circ$  (ver figura) y un alcance de  $R = 1.2 \text{ km}$ . Tras un análisis de mercado, la compañía utiliza los siguientes datos para estimar la demanda de tráfico en el sistema.

- Densidad de usuarios:  $\alpha = 15 \text{ habitantes/Km}^2$ .
- Tráfico por usuario:  $\rho = 80 \text{ miliErlangs}$ .

Además, los ingenieros establecen que el exponente de pérdidas de propagación de la zona es  $\gamma = 4$ . Si la tecnología que se va a desplegar requiere una *CIR* mayor de  $12 \text{ dB}$ , se pide resolver razonadamente a las siguientes cuestiones.

- (a) ¿Cuántos canales tendrá que adquirir la compañía si pretende ofrecer una calidad de servicio del 95% a sus clientes?  
*Para el cálculo de la interferencia co-canal utilizar únicamente la interferencia causada por la primera corona interferente y que las células interferentes se encuentran a la distancia de reuso.*
- (b) Utilizando los mismos canales, ¿se podría plantear una solución con antenas omnidireccionales?

*Utilizar, en el resto de apartados, el despliegue basado en las antenas sectoriales.*

Debido al crecimiento del núcleo urbano del área, la compañía se ve obligada a desplegar una célula *paraguas* para cubrir la demanda adicional. Para ello utiliza una antena con un patrón de radiación *triangular*, con un alcance de  $R_{\text{paraguas}} = \sqrt{3}R \text{ km}$ , tal y como se muestra en la figura; el núcleo urbano cubre *exactamente* los tres hexágonos que se muestran en la figura, en los que la densidad crece hasta los  $\alpha_{\text{nu}} = 20 \text{ habitantes/Km}^2$ .

Se establece que las llamadas de los usuarios cubiertos por la célula *paraguas* sean atendidas, inicialmente, por ella, desbordando al despliegue original si no tuviera capacidad disponible.

- (c) Asumiendo que el operador decide contratar grupos de 4 canales,  $M \times [4 + 4]$ , ¿cuántos

grupos se tendrían que adquirir para la célula paraguas, si se asume ocupación aleatoria y se pretende que la ocupación mínima por canal sea del 75 %?

- (d) Calcular el *GoS* medio para un usuario que se encuentre en el núcleo urbano.

**Sugerencia:** Promediar los *GoS* correspondientes a las diferentes 'zonas' (o sectores) que conforman todo el área del núcleo urbano.

Asumir independencia entre las ocupaciones de las dos infraestructuras de red y que el tráfico desbordado sigue una distribución de Poisson.

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

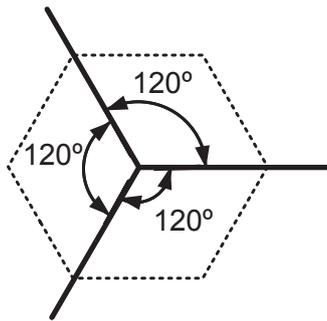
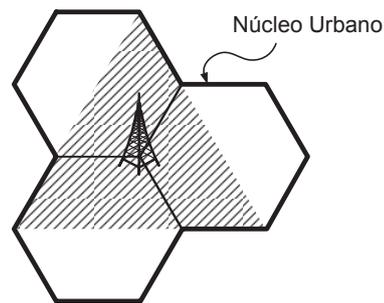


Diagrama de radiación de 120°



Despliegue de la célula paraguas

**Problema 28.** La compañía *GreenWireless* está diseñando una red de comunicaciones móviles en una zona rural, con los siguientes datos de mercado.

- Densidad de usuarios:  $\alpha = 14$  habitantes/ $\text{Km}^2$ .
- Tráfico por usuario:  $\rho = 101$  *miliErlangs*.

Para ello dispone de antenas sectoriales de  $180^\circ$  con una cobertura de  $R = 900$  m. Tras las correspondientes simulaciones, establece la situación de las antenas, dando lugar a la red que se muestra en la figura.

- (a) Si la empresa cuenta con 36+36 canales (*ascendentes + descendentes*) para dar el servicio, ¿cuál es el factor de reuso máximo que podría emplear, si pretende ofrecer una calidad de servicio del 95 % a sus clientes?
- (b) Se estima que el exponente de pérdidas de propagación de la zona es  $\gamma = 2.9$ , ¿cuál sería la *CIR* del sistema?  
*Utilizar la celda 'x' para el cálculo. En el cálculo de la CIR asumir que todas las BS interferentes se encuentran a la distancia de reuso.*
- (c) A la hora de desplegar la red, los ingenieros se percatan de que las antenas radian una potencia espuria en el sentido contrario al de la señal de interés ( $\sigma \cdot P_{tx}$ ), ¿cuál es el valor máximo de  $\sigma$  que asegura un comportamiento adecuado del sistema, sabiendo que se necesita garantizar una *CIR* de 12 dB?

Tras la puesta en marcha del sistema, se detecta que la densidad de usuarios en el núcleo urbano (con una extensión de cuatro de los sectores originales) es superior a la inicialmente prevista,

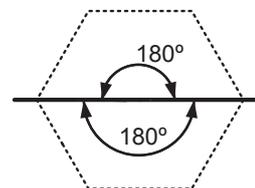
creciendo hasta  $\alpha_{nu} = 20.46$  habitantes/Km<sup>2</sup>. Los ingenieros deciden instalar dos estaciones base con patrón de radiación triangular, tal y como se muestra en la figura. Los usuarios que estén en la cobertura de las nuevas antenas serían atendidos por ellas y, solo si estuvieran ocupadas, serían ofrecidas al despliegue original. La empresa contrata 2+2 canales (*ascendentes + descendentes*) para cada una de los dos nuevos emplazamientos.

(d) ¿Cuál es el grado de servicio medio en el núcleo urbano?

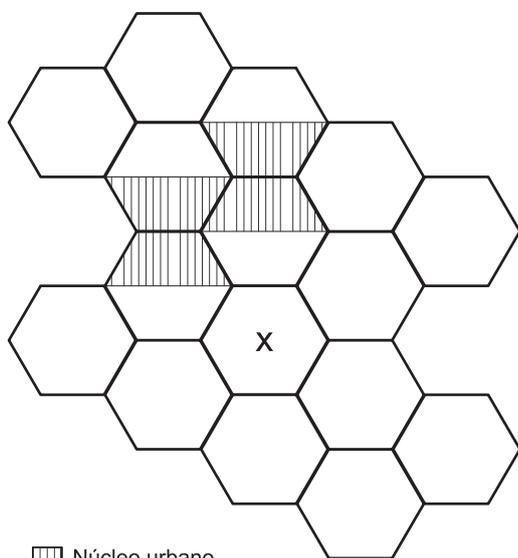
**Sugerencia:** Promediar los GoS correspondientes a las diferentes ‘zonas’ que conforman todo el área del núcleo urbano.

Asumir independencia entre las ocupaciones de las dos infraestructuras de red y que el tráfico desbordado sigue una distribución de Poisson.

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

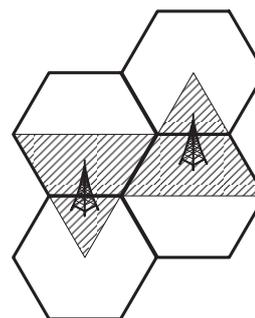


Patrón de radiación de 180°



▨ Núcleo urbano

Emplazamiento de las BS en la zona rural



Despliegue adicional

**Problema 29.** La compañía *Imura* está diseñando una red de comunicaciones móviles en una zona rural, con los siguientes datos de mercado.

- Densidad de usuarios:  $\alpha = 16$  habitantes/Km<sup>2</sup>.
- Tráfico por usuario:  $\rho = 75$  miliErlangs.

Para ello dispone de antenas omnidireccionales con una cobertura de  $R = 800$  m, que se disponen en el terreno para formar la red que se muestra en la figura.

- (a) Si la empresa podría adquirir hasta 32+32 canales (*ascendentes + descendentes*) para dar el servicio, ¿cuál es el factor de reuso máximo que podría emplear, si pretende ofrecer una calidad de servicio del 95% a sus clientes? ¿Cuántos canales necesitará finalmente **Imura**?
- (b) Si se requiere que la CIR del sistema sea superior a 12 dB, ¿cuál sería el valor mínimo del exponente de pérdidas de propagación que garantizaría un correcto funcionamiento del sistema?

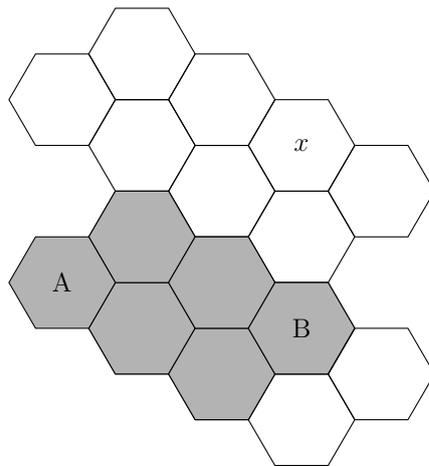
Utilizar la celda 'x' para el cálculo. En el cálculo de la CIR asumir que todas las BS interferentes se encuentran a la distancia de reuso.

Tras la puesta en marcha del sistema, se detecta que la densidad de usuarios en el centro de la población (que cubre seis de las celdas originales) es superior a la inicialmente prevista, creciendo hasta  $\alpha_{nu} = 21.65$  habitantes/Km<sup>2</sup>. Los ingenieros deciden instalar dos estaciones base *paraguas* en los mástiles **A** y **B**, con patrón de radiación de 120° (con la referencia de la figura los haces serían  $[-60^\circ, 60^\circ]$  y  $[240^\circ, 120^\circ]$ , respectivamente) y cobertura  $R_s = 2R$ .

- (c) Si con el objetivo de ahorrar costes *Imura* decide emplear las misas frecuencias en los dos nuevos emplazamientos, ¿cuál sería la CIR correspondiente a este nuevo despliegue, si se asume que el exponente de pérdidas de propagación es  $\gamma = 4$ ?
- (d) La empresa adquiere 2 + 2 (*ascendentes + descendentes*) canales y decide que los usuarios que estén en la cobertura de las nuevas antenas sean atendidos inicialmente por ellas, desbordando posteriormente al despliegue original. Calcular el grado de servicio medio en el centro de la población

**Sugerencia:** Promediar los GoS correspondientes a las diferentes 'zonas' que conforman todo la superficie.

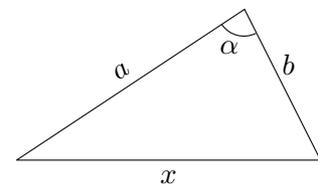
Asumir independencia entre las ocupaciones de las dos infraestructuras de red y que el tráfico desbordado sigue una distribución de Poisson.



Emplazamiento de las BS en la zona rural

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

Teorema coseno:



$$x^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \alpha$$

**Problema 30.** Una compañía de comunicaciones móviles (**A**) pretende desplegar un sistema celular en un área rural, para lo que cuenta con antenas sectoriales de 120° con un alcance de 800 m. Para estimar el tráfico, cuenta con los siguientes datos de mercado.

- Densidad de usuarios:  $\alpha = 20.5$  habitantes/Km<sup>2</sup>.
- Tráfico por usuario:  $\rho = 132$  miliErlangs.

- (a) Si el exponente de pérdidas de propagación es  $\gamma = 3.4$ , ¿cuál es el factor de reuso que tendría que utilizar la compañía, si se necesita que la CIR del sistema sea mayor de 12 dB y en la zona existe otro operador que genera una interferencia adicional que se estima en

2 dB?

En el cálculo de la CIR co-canal considerar únicamente la primera corona interferente y asumir que las BS se encuentran a la distancia de reuso.

- (b) ¿Cuántos canales necesitaría contratar la compañía para garantizar un GoS del 95 %?

Finalmente, tras analizar las diferentes alternativas se deciden adquirir 72 (36 + 36) canales (*ascendentes + descendentes*) y establecer un acuerdo con la compañía **B**, que dispone en el área de antenas omnidireccionales (en los mismos emplazamientos que **A**), para que curse un conjunto de llamadas. Se sabe que **B** tiene 5 canales por estación base y el tráfico de sus clientes es de 1.3 *Erlangs* por celda.

- (c) ¿Qué porcentaje de llamadas se podrían reenviar a la infraestructura del operador **B** (sin desbordamiento) para que el *GoS* de los clientes de este operador se mantuviera por encima del 95 %? ¿Cuál sería el grado de servicio promedio de los clientes de **A** en este caso?
- (d) En una segunda alternativa todas las llamadas son cursadas, inicialmente, por la infraestructura de **A**, desbordando a **B**. ¿Cuál es el grado de servicio para ambos grupos de clientes en este caso?

Asumir independencia entre las ocupaciones de las dos infraestructuras de red y que el tráfico desbordado sigue una distribución de Poisson.

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

**Problema 31.** Considérese la red celular que se muestra en la Figura 1, donde las letras  $\phi, \theta, \eta$  identifican las frecuencias utilizadas por cada estación base. La cobertura de las antenas es  $R = 1.2 \text{ km}$ .

- (a) ¿Cuál es la CIR co-canal del sistema en dB, si se supone que el exponente de pérdidas de propagación es  $\gamma = 3.44$ ?

En el cálculo de la CIR asumir que todas las BS interferentes se encuentran a la distancia de reuso.

- (b) Para que el sistema funcione correctamente se necesita garantizar que la relación entre la señal de interés y toda la interferencia sea superior a 12 dB. Los ingenieros radio establecen que hay una fuente de interferencia adicional en la zona, cuya función de probabilidad acumulada complementaria (*ccdf*) es la que se muestra en la Figura 2. ¿Cuántas horas al año se podrían producir cortes en el servicio?

Tener en cuenta que  $ccdf = 1 - cdf$ .

- (c) Se asume que la densidad de población en toda el área es constante,  $\alpha = 12.14 \text{ habitantes/km}^2$ , pero debido a las características urbanísticas de la zona, los ingenieros de red establecen que el tráfico por usuario es diferente en cada área:  $\rho_\phi = 44 \text{ mErlangs}$ ,  $\rho_\theta = \rho_\eta = 66 \text{ mErlangs}$ . ¿Cuál es el GoS promedio, si el operador cuenta con 15 + 15 canales (*ascendentes + descendentes*) para dar el servicio?

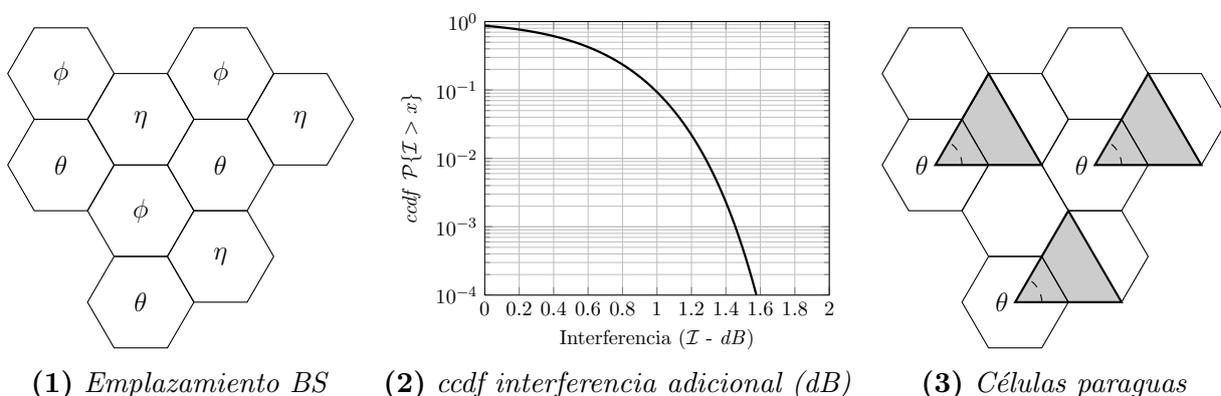
Para incrementar el GoS, se utilizan tres células paraguas en los mástiles  $\theta$ , con un patrón de radiación de  $60^\circ$  y un alcance de  $2R$ , tal y como se ve en la Figura 3. El operador utiliza los mismos recursos en cada una (diferentes a los anteriores) y establece que los usuarios, siempre

que puedan, intenten conectarse a estas células paraguas y, solo cuando estén ocupadas, utilicen el despliegue de red original.

- (d) Calcular el valor más exacto posible de la CIR correspondiente a este nuevo despliegue, utilizando para ello la localización más restrictiva.
- (e) Calcular el grado de servicio medio con la nueva topología de red, asumiendo que cada célula paraguas cuenta con 2+2 canales (ascendentes + descendentes).

**Sugerencia:** Promediar los GoS correspondientes a las diferentes ‘zonas’ que conforman toda la superficie.

Asumir independencia entre las ocupaciones de las dos infraestructuras de red y que el tráfico desbordado sigue una distribución de Poisson.



**Problema 32.** Considérese la red celular que se muestra en la Figura 1, donde las letras  $\phi, \theta, \eta, \sigma$  identifican los grupos de frecuencias utilizados por cada estación base. La cobertura de las antenas es  $R = 900 m$ . Los datos de mercado que se tienen son los siguientes:

- Densidad de usuarios:  $\alpha = 8.5$  habitantes por  $km^2$ .
- Tráfico por terminal:  $\rho = 44.7$  miliErlangs.

- (a) Si la CIR que necesita el sistema es de 10 dB y los ingenieros han dejado un margen de 1 dB adicional a la hora de establecer el factor de reuso en base a la CIR co-canal, ¿qué valor tiene el exponente de pérdidas de propagación,  $\gamma$ , que caracteriza el terreno?

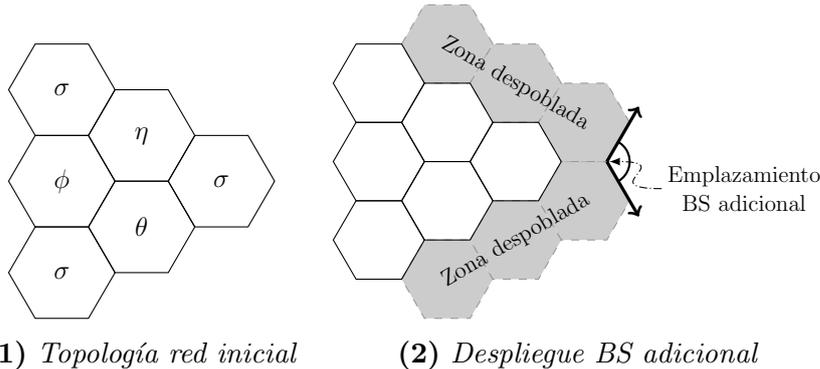
En el cálculo de la CIR asumir que todas las BS interferentes se encuentran a la distancia de reuso.

- (b) ¿Cuántos canales necesitaría el operador, para ofrecer un GoS del 4%?

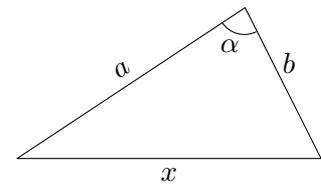
Como se ve en la Figura 2, el operador tiene que dar servicio en una zona situada al este de la población anterior, donde se va a construir un parque tecnológico. Para ello utiliza una antena sectorial, de  $120^\circ$ , con un patrón de radiación entre  $-60^\circ$  y  $60^\circ$ , que sitúa según se indica en el diagrama. El alcance de esta antena es de  $1.8 km$ , siendo su potencia de transmisión 3 veces mayor que la de las antenas omnidireccionales del despliegue anterior.

- (c) ¿Cuántos canales se necesitarían para garantizar un GoS del 4% en dicho área, si se considera que la densidad en la zona del parque es  $\alpha_p = 16$  usuarios/ $km^2$  y el tráfico generado por terminal es  $\rho_p = 93.5$  miliErlangs?

- (d) El operador pretende reutilizar grupos de frecuencias del despliegue original en la nueva celda, ¿cuáles debería utilizar? ¿Cuál es la CIR que afecta al nuevo emplazamiento, considerando que, por la presencia de la zona no poblada, el exponente de pérdidas de propagación a considerar sería  $\gamma = 2.4$ ?
- (e) Teniendo en cuenta que el operador utiliza, en el nuevo despliegue, todos los canales correspondientes a los grupos de frecuencia seleccionados, calcular el grado de servicio promedio que ofrece, considerando todos sus clientes.



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



$$x^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \alpha$$

Teorema coseno

**Problema 33.** Para dar un servicio de comunicaciones móviles en una zona que se puede considerar lo suficientemente extensa, un operador dispone de los siguientes datos:

- Densidad de usuarios:  $\alpha = 10 \text{ u/km}^2$ .
- Tráfico por usuario:  $\rho = 120 \text{ mErlangs}$ .

Cuenta con antenas omnidireccionales, con una cobertura  $R = 800 \text{ m}$  y ha adquirido 32 canales (16 + 16), (*ascendentes* + *descendentes*).

- (a) ¿Cuál es el factor de reuso que debería utilizar el operador, si se pretende garantizar un *GoS* del 96 %?
- (b) Asumiendo que las BS interferentes se encuentran a la distancia de reuso, ¿cuál sería la CIR del sistema, si se supone que el exponente de pérdidas de propagación es  $\gamma = 3.7$ ? ¿Qué probabilidad de bloqueo tendría el sistema si se tuviera que garantizar una CIR superior a 12 dB, sin incrementar el número de canales totales?

Ante una subida de la población en el área,  $\alpha^\dagger = 17 \text{ u/km}^2$ , el operador se plantea ampliar su despliegue, utilizando como punto de partida la modificación realizada para que la CIR estuviera por encima de los 12 dB. Para ello adquiere antenas con cobertura  $2R$ , con dos posibles configuraciones: omnidireccionales y sectoriales de  $120^\circ$ . Para reducir la inversión de la nueva instalación decide aprovechar mástiles del despliegue anterior.

- (c) Si la CIR tiene que ser superior a 12 dB, ¿qué factor de reuso se debería utilizar en cada una de las dos configuraciones del nuevo despliegue?
- (d) Se establece que las llamadas serán atendidas inicialmente por el despliegue original, que desbordaría al nuevo, en caso de que todos los canales estuvieran ocupados. ¿Cuántos canales debería adquirir el operador para la nueva infraestructura de red en cada una de las dos alternativas, si se requiere que el *GoS* global sea superior al 96 %?

**Problema 34.** Considerar la red que se muestra en la Figura (a), en la que  $\pi, \beta, \varphi$  se corresponden con grupos de frecuencias diferentes. Se sabe que la cobertura de las antenas desplegadas es  $R = 750 \text{ m}$  y se cuenta, además, con los siguientes datos:

- Densidad de usuarios:  $\alpha = 12.82 \text{ u/km}^2$ .
- Tráfico por usuario:  $\rho = 80 \text{ mErlangs}$ .

Para dar el servicio el operador cuenta con 24 canales ( $12 + 12$ , *ascendentes/descendentes*).

- (a) Calcular el *GoS* de la red y la CIR del sistema, asumiendo que las BS interferentes se encuentran a la distancia de reuso, y sabiendo que el exponente de pérdidas de propagación es  $\gamma = 3.39$ .
- (b) Para hacer frente a posibles interferencias adicionales, se decide modificar el patrón del despliegue celular, de manera que la CIR co-canal sea mayor que  $14 \text{ dB}$ . ¿Cuál sería la probabilidad de bloqueo que se podría conseguir, si el operador decide no adquirir más capacidad? ¿Cuál es la CIR co-canal que caracterizaría el sistema?

La Figura (b) muestra una zona comercial (destacada en gris), en la que la densidad de usuarios crece hasta  $\alpha^{\S} = 24.7 \text{ u/km}^2$ . Se decide ampliar la red, partiendo de la configuración del apartado (a), situando 4 antenas sectoriales de  $60^\circ$ , con una cobertura de  $2R$ , que se instalan en mástiles de la red original, tal y como se muestra en la Figura (c). El operador adquiere 8 canales para el nuevo despliegue ( $4 + 4$ , *ascendentes/descendentes*).

- (c) Si la CIR co-canal del nuevo despliegue también tuviera que ser superior a  $14 \text{ dB}$ , ¿cuántos canales se utilizarían en cada una de las cuatro antenas desplegadas? ¿Cuál debería ser la CIR co-canal admisible para que pudiera utilizar todos los canales ( $4+4$ ) en cada una? *Asumir como máximo dos fuentes de interferencia co-canal.*
- (d) El operador decide finalmente utilizar  $2+2$  canales en cada una de las cuatro antenas, y establece que las llamadas serán atendidas inicialmente por el despliegue original, que desbordaría al nuevo, en caso de que todos los canales estuvieran ocupados. ¿Cuál es el *GoS* promedio en la superficie de la zona comercial? *Realizar el cálculo en el área central de la misma.*

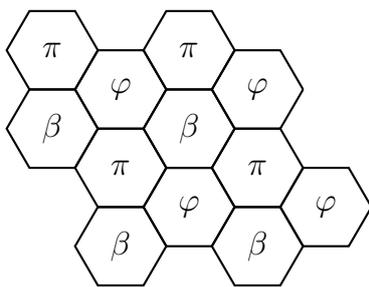


Figura (a)

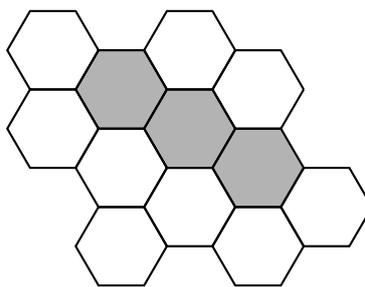


Figura (b)

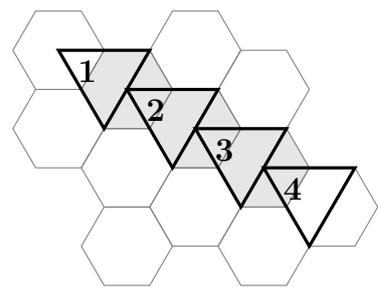


Figura (c)

**Problema 35.** Se pretende desplegar una red de comunicaciones móviles para dar servicio en un área determinada, en la que los ingenieros estiman que el exponente de pérdidas de propagación es  $\gamma = 2.7$ . Para ello se decide utilizar antenas omnidireccionales, con una cobertura de  $750$

$m$ , desplegadas según se muestra en la Figura (a). La compañía cuenta con  $15 + 15$  canales (ascendentes + descendentes), y utiliza los siguientes datos para estimar la demanda de tráfico:

- Densidad de usuarios:  $\alpha = 10.26 \text{ u/km}^2$ .
- Tráfico por usuario:  $\rho = 80 \text{ mErlangs}$ .

- (a) Teniendo en cuenta que la celda 1 pertenece a un clúster completo, calcular la CIR del sistema, si se pretende que la probabilidad de bloqueo sea inferior al 4%.

*Para el cálculo de la CIR, asumir que las antenas interferentes son los de la primera corona, y que se encuentran a la distancia de reuso del punto de cálculo.*

A la hora de realizar el despliegue, la compañía se percató que no se pueden utilizar los mástiles para las estaciones base 4 y 7 (ver Figura (b)), por lo que se plantea un diseño de red diferente, en el que además buscará incrementar la CIR. Para ello adquiere más canales, hasta disponer de  $32 + 32$  (de los que  $4 + 4$  se reservan para las estaciones base adicionales que se necesitarán desplegar).

- (b) Plantear un despliegue de recursos razonable para las celdas originales (sin contar las que no se pueden desplegar: 4 y 7) y calcular la CIR que caracterizaría a esta parte del sistema, dando el valor más preciso posible.

Para cubrir las zonas en las que no se ha podido desplegar las BS 4 y 7 la compañía plantea utilizar antenas sectoriales ( $60^\circ$ ), de cobertura  $1.5 \text{ km}$ , que se instalarían en los mástiles 3, 5, 6 y 8 (Figura (c)).

- (c) Sabiendo que se utilizarán  $2 + 2$  canales en cada una de estas cuatro BS (utilizando los  $4 + 4$  reservados previamente), calcular la CIR que afectaría a este despliegue de red.
- (d) Calcular la probabilidad de bloqueo promedio del sistema, asumiendo que en aquellas zonas en las que haya dos alternativas de conexión, las llamadas se reparten de manera aleatoria entre ambas, sin que exista desbordamiento.

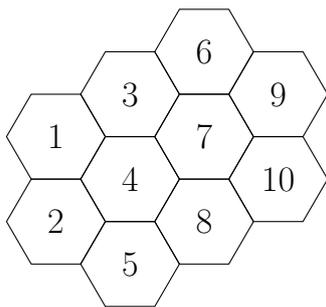


Figura (a)

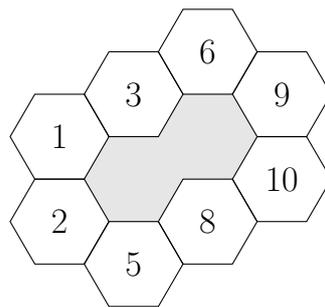


Figura (b)

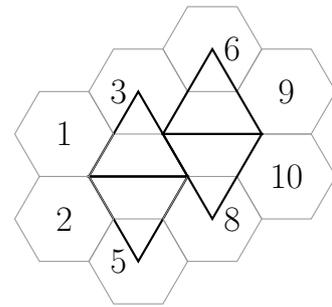


Figura (c)

**Problema 36.** El despliegue de red celular en una población es el que muestra la Figura (a). Se utiliza un factor de reuso  $N = 3$  (las celdas 1, 2 y 5 forman un *cluster*) y se considera inicialmente antenas omnidireccionales con cobertura  $R = 1.1 \text{ km}$ . Para llevar a cabo el diseño de red se usan los siguientes datos, en los que se distinguen dos zonas: (1) la periferia, que abarca las celdas 1, 2, 3, 6, 8 y 9; y (2) el núcleo urbano, que se corresponde con las celdas 4, 5 y 7.

- Densidad de usuarios:  $\{\alpha_1; \alpha_2\} = \{8.97; 13.27\} u/km^2$ .
- Tráfico por usuario:  $\{\rho_1; \rho_2\} = \{85; 115\}$  mErlangs.

- (a) Si se pretende que la probabilidad de bloqueo (PB) para cualquier usuario sea inferior al 5%, ¿cuántos canales necesitaría adquirir el operador? Calcular la PB promedio, así como la utilización por canal, asumiendo ocupación aleatoria. Sabiendo que el exponente de pérdidas de propagación es  $\gamma = 2.73$ , calcular la CIR del sistema.  
*Para el cálculo de la CIR, asumir que las antenas interferentes se encuentran a la distancia de reuso del punto de cálculo.*
- (b) ¿Cuántos canales serían necesarios si se utilizaran antenas sectoriales de  $120^\circ$  (utilizando el patrón de radiación que se muestra en la Figura (b))? ¿Cuál sería la probabilidad de bloqueo promedio y la ocupación por canal con esta configuración?
- (c) Calcular la CIR al utilizar antenas sectoriales. Asumir inicialmente que las antenas interferentes se encuentran a la distancia de reuso del punto de cálculo. Evaluar la precisión de dicha aproximación, calculando la CIR de manera más exacta. ¿Qué ventaja adicional presenta, desde el punto de vista de la interferencia, la utilización de antenas sectoriales?

Utilizando como base la configuración con antenas sectoriales, se plantea un diseño alternativo. En él, los canales de la red original se dimensionan para que la probabilidad de bloqueo correspondiente a la periferia no supere el 5%, mientras que para compensar el incremento de tráfico en el núcleo urbano se utilizan antenas sectoriales, de cobertura  $2R$ , en configuración “paraguas”. Se utilizan los mástiles de las celdas 1, 6 y 8 (Figura (c)), estableciendo que las llamadas que no puedan cubrirse por el despliegue original desborden a las paraguas.

- (d) ¿Cuántos canales se necesitarían para mantener la PB del 5% para cualquier usuario? Calcular la PB promedio del sistema.

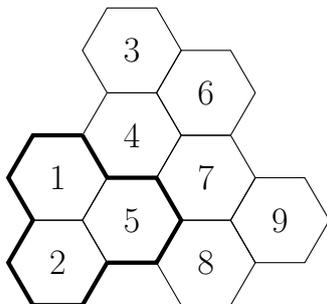


Figura (a)

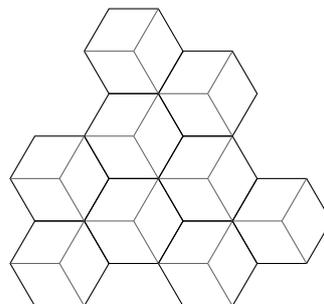


Figura (b)

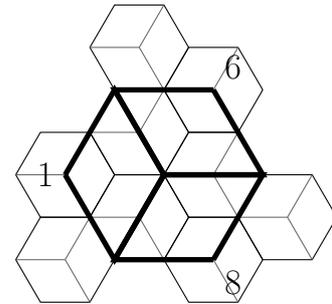


Figura (c)

**Problema 37.** Se pretende desplegar una red de comunicaciones móviles para dar servicio en un área determinada, utilizando antenas omnidireccionales, con cobertura de  $900 m$ , según se muestra en la Figura (a). El exponente de pérdidas de propagación es  $\gamma = 2.411$ . La compañía cuenta con  $36 + 36$  canales (ascendentes + descendentes), y utiliza los siguientes datos para estimar la demanda de tráfico:

- **Periferia** (celdas 1, 2, 3, 4, 7, 8, 10, 11, 12)

- Densidad de usuarios:  $\alpha = 8.145 \text{ u}/\text{km}^2$ .
- Tráfico por usuario:  $\rho = 70 \text{ mErlangs}$ .

■ **Núcleo urbano** (celdas 5, 6, 9)

- Densidad de usuarios:  $\alpha^\dagger = 19 \text{ u}/\text{km}^2$ .
- Tráfico por usuario:  $\rho^\dagger = 100 \text{ mErlangs}$ .

- (a) Teniendo en cuenta que la celda 1 pertenece a un clúster completo, calcular la CIR del sistema, si se pretende que la probabilidad de bloqueo sea inferior al 4% para cualquier usuario, asumiendo que las antenas interferentes se encuentran a la distancia de reuso del punto de cálculo. Calcular la CIR de manera más exacta, comentando brevemente la precisión de la aproximación realizada.

Se decide evaluar un diseño alternativo, en el que se sitúa una BS sectorial de  $120^\circ$ , con un alcance de  $1.8 \text{ km}$ , según el patrón de radiación que se muestra en la Figura (b), en el punto central del núcleo urbano, y se eliminan las BS correspondientes (5,6,9) (ver Figura (c)). Para lograr ese alcance la potencia transmitida por la antena sectorial es  $\frac{3}{2}$  veces superior a la de las BS omnidireccionales (periferia):  $P_{\text{tx}}^\dagger = \frac{3}{2}P_{\text{tx}}$ .

- (b) Plantear un despliegue de canales razonable, manteniendo el requisito de que la PB tiene que ser inferior al 4% para cualquier usuario, y calcular la CIR del sistema, de la manera más precisa posible. *Asumir que la nueva BS únicamente atiende las llamadas provenientes de los usuarios en el núcleo urbano*
- (c) ¿Cuál es la PB promedio del sistema si se decide que en aquellas zonas en las que haya dos alternativas de conexión, las llamadas elijan una u otra de manera aleatoria?

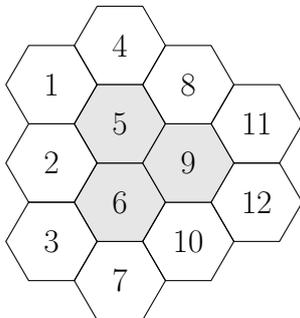


Figura (a)

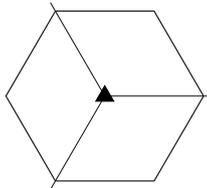


Figura (b)

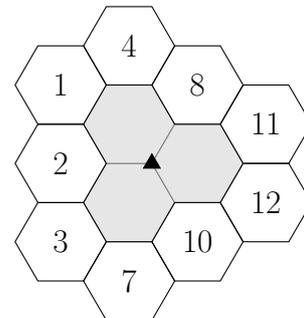


Figura (c)

**Problema 38.** Un operador de comunicaciones móviles tiene que dar servicio en un área determinada, para lo que utiliza antenas omnidireccionales, con un alcance de  $R = 900 \text{ m}$ , que se despliegan según se ve en la Figura (a). Se sabe que la densidad de usuarios es  $\alpha = 7.12 \text{ h}/\text{km}^2$ , y se supone que el tráfico generado por usuario es  $80 \text{ mErlangs}$ .

- (a) Sabiendo que las celdas 1, 2, y 3 forman un clúster completo, ¿cuál es la CIR del sistema, si el exponente de pérdidas de propagación es  $\gamma = 3.4$ ? ¿Cuántos canales necesitará el operador, si se requiere que la probabilidad de bloqueo sea inferior al 3%?

Asumir las BS interferentes de la primera corona, y que se encuentran a la distancia de reuso del punto de cálculo de la CIR

Tras la puesta en marcha del sistema, los ingenieros de red se percatan de que la densidad de usuarios no es uniforme en todo el área, como se representa en la Figura (b). Así, en las celdas 7, 8 y 9 prácticamente no hay usuarios, y el tráfico se puede considerar despreciable. Sin embargo, en la superficie cubierta por las celdas 10, 11 y 12, debido a la presencia de una urbanización, la densidad de usuarios crece hasta  $\alpha^\dagger = 8.9 \text{ h/km}^2$ .

- (b) Calcular la PB promedio del sistema. En una primera estimación, utilizar la superficie para llevar a cabo el promedio. Dar un resultado más preciso, teniendo en cuenta la densidad de usuarios. ¿Cuál es la utilización media por canal en cada una de las tres zonas?

El operador se plantea eliminar las BS que dan servicio a las celdas 7, 8 y 9, y utilizar una BS omnidireccional, de cobertura  $2R$  (su potencia de transmisión es 2.5 superior a las del despliegue original) para cubrir el tráfico de la urbanización (eliminado por tanto las celdas 10, 11 y 12), según se ve en la Figura (c). Además adquiere 5 canales adicionales para compensar el incremento de tráfico en dicha zona.

- (c) Calcular las CIR que caracterizan el sistema (tanto en el despliegue original como el correspondiente a la nueva BS). Dar el valor más exacto posible.  
 (d) Calcular la PB promedio del sistema (teniendo en cuenta las densidades de usuarios), y la utilización por recurso (tanto en el despliegue original como en la nueva BS).

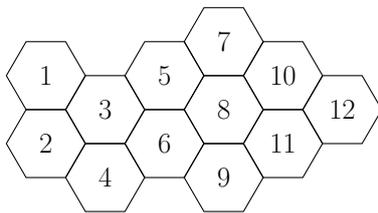


Figura (a)

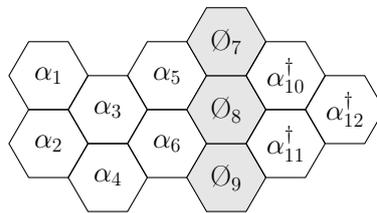


Figura (b)

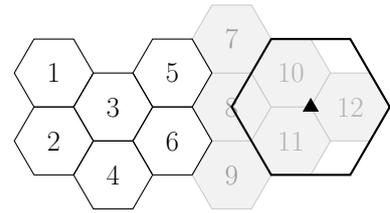
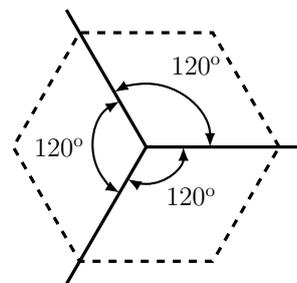
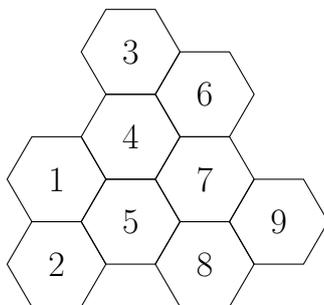


Figura (c)

**Problema 39.** Un operador de comunicaciones móviles quiere desplegar una red para dar servicio en una zona determinada, caracterizada por un exponente de pérdidas de propagación  $\gamma = 3.7$ . Decide emplear antenas sectoriales de  $120^\circ$ , con una cobertura  $R = 800 \text{ m}$ , que se sitúan como se muestra en la figura.



Para ello cuenta con  $50 + 50$  canales (ascendentes + descendentes), y los estudios previos indican

que la densidad de usuarios se sitúa en  $\alpha = 32.8 \text{ km}^{-2}$ , y que el tráfico por usuario es  $\rho = 110 \text{ mErlangs}$ .

- (a) ¿Cuál sería la CIR co-canal del sistema, si se pretende garantizar un GoS del 96% a los usuarios? *Asumir en este apartado que las antenas interferentes se encuentran a la distancia de reuso del punto de cálculo de la CIR*
- (b) Calcular la CIR co-canal de manera exacta. ¿Cuál es el error que se comete (en dB) al utilizar la distancia de reuso? ¿Cuál habría sido el error al utilizar alguna de las aproximaciones de Lee? Si se requiere que la CIR del sistema sea superior a 12 dB, ¿qué interferencia adicional (en dB) se podría admitir para los tres valores de CIR co-canal que se han calculado?

Ante un incremento de la densidad de usuarios en una zona de la red (células 3-7), que sube a  $\alpha_{\dagger} = 39.3 \text{ km}^{-2}$ , la compañía pretende desplegar una BS adicional, con una cobertura  $3R$  y un patrón de radiación de  $120^\circ$ . Las llamadas efectuadas en dichas células se ofrecerían inicialmente a la nueva BS, que desbordaría al despliegue original, si no tuviera recursos.

- (c) Indicar los dos puntos posibles para instalar la nueva estación base, y establecer el GoS promedio en la zona con mayor densidad de usuarios, si la compañía no adquiere ningún canal adicional, y mantiene el despliegue anterior sin modificar.

**Problema 40.** Un operador de comunicaciones móviles quiere desplegar una red para dar servicio en un área determinada, caracterizada por un exponente de pérdidas de propagación  $\gamma = 3.62$ . Se plantea utilizar antenas omnidireccionales, con una cobertura  $R = 700 \text{ metros}$ , según el despliegue que se muestra en la Figura (a). Además, cuenta con  $20 + 20$  canales (ascendentes + descendentes), y el estudio previo de mercado establece los siguientes datos:

- Densidad de usuarios:  $\alpha = 24.5 \text{ km}^{-2}$
- Tráfico por usuario:  $\rho = 80 \text{ mErlangs}$

- (a) Calcular la CIR del sistema, si el operador pretende ofrecer un GoS del 97% a sus clientes. *Para el cálculo de la CIR asumir que las BS interferentes se encuentran a la distancia de reuso.*

Debido a la expansión del núcleo urbano se percibe un incremento de la población en varias celdas (4, 7, 8, 9, 10, 11), cuya densidad pasa a ser  $\alpha_{\dagger} = 31.4 \text{ km}^{-2}$ .

- (b) Calcular el GoS promedio en toda la red, si no se modificara el diseño de la misma.
- (c) El operador se plantea añadir un canal adicional en cada una de las BS del núcleo urbano para hacer frente a ese incremento de la población. ¿Cuántos canales debería adquirir? ¿Cuál sería el GoS promedio? ¿Cambiaría la CIR del sistema?

En un segundo diseño (sin adquirir nuevos canales) el operador se plantea incorporar dos BS, con patrón de radiación  $60^\circ$ , y cobertura  $3R$ , situadas según se muestra en la Figura (b). En las zonas cubiertas por el nuevo despliegue de red, las llamadas serán ofrecidas inicialmente a la nueva BS. En caso de que no tuviera recursos, desbordaría al despliegue original.

- (d) ¿Cuál sería la CIR correspondiente a esta infraestructura de red? ¿Se podría plantear alguna modificación para mitigar el impacto de la CIR?
- (e) ¿Cuál sería el GoS promedio en el área urbana? ¿Y en toda la red?

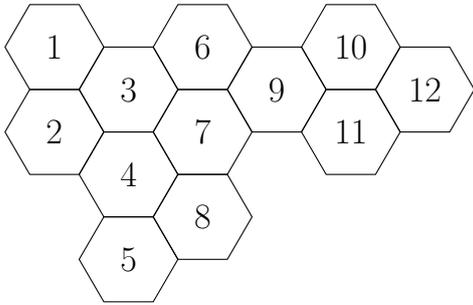


Figura (a)

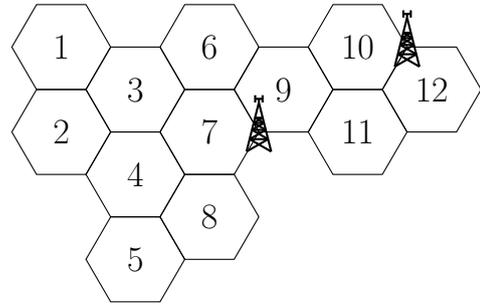


Figura (b)



Tema 4 - Comunicaciones móviles  
Soluciones de la hoja de problemas

**Problema 1.**

- (a) 3 radiocanales en una microcélula.
- (b) 27 radiocanales en una macrocélula.

**Problema 2.**

- (a)  $R = 1 \text{ km}$ .
- (b)  $CIR = 12 \text{ dB}$ .
- (c) Giro en el sentido contrario agujas reloj.
- (d)  $CIR = 16.9 \text{ dB}$ .
- (e)

**Problema 3.**

- (a)  $N = 3$ .
- (b)  $K = 4$  circuitos.
- (c) 12 frecuencias *downlink*, 12 *uplink*.
- (d)

**Problema 4.**

- (a) 291 usuarios.
- (b)  $\approx 2\%$ .
- (c)  $12.1 \text{ dB}$ .
- (d)  $16.8 \text{ dB}$ .
- (e)  $9.52 \cdot 10^{-2}$ .

**Problema 5.**

- (a)  $N = 7$ .
- (b)  $K = 12$  canales.
- (c)  $23.43 \text{ dB}$ .
- (d)  $N = 4$ .
- (e)  $\rho < 8.7$  abonados/ $\text{km}^2$ .

**Problema 6.**

- (a)  $N = 5$ .
- (b)  $K = 20$  circuitos.
- (c) 100 frecuencias.
- (d) 120 frecuencias.
- (e) 140 frecuencias  
(Con 120 también valdría).

**Problema 7.**

- (a)  $N = 4$ .
- (b)  $K = 8$  canales.
- (c)  $32+32$  frecuencias.
- (d)

**Problema 8.**

- (a)  $N = 7$
- (b) No ( $CIR \approx 12 \text{ dB}$ ).
- (c) Sí ( $CIR \approx 15 \text{ dB}$ ).
- (d)  $\sigma \leq 0.277$ .

**Problema 9.**

- (a)  $N = 4$ .
- (b) Sí.
- (c) No.
- (d)  $N = 3$ . Sí.

**Problema 10.**

- (a)  $N = 3$ .
- (b)  $\sigma \leq 0.128$ .
- (c)  $\alpha \leq 15.75$  coches/ $\text{km}$ .
- (d) No. 9 canales.

### **Problema 11.**

- (a)  $N = 4$ .
- (b) Sí.
- (c)  $\sigma \leq 0.203$ .
- (d) 84 canales: 12 (6+6) por célula.
- (e) 42 canales: 6 (3+3) por microcélula.
- (f)  $5 \cdot 10^{-4}$ .

### **Problema 12.**

- (a)  $N = 4$ .
- (b) 48 canales: 12 (6+6) por célula.
- (c) 72 canales: 18 (9+9) por célula.
- (d) 16 canales: 4 (2+2) por célula.
- (e) 0.0325
- (f) 60 canales para el segundo sistema: 20 (10+10) por célula.

### **Problema 13.**

- (a)  $N = 3$ .  
48 canales (24+24).
- (b) 37.5 %.

### **Problema 14.**

- (a)  $N = 3$ .
- (b) Si. ( $CIR \approx 11.3$  dB).
- (c)  $CIR \approx 14.3$  dB. Más antenas y tras-pasos.
- (d) Incrementar el factor de reuso a  $N = 4$ .  
 $CIR \approx 13.2$  dB.
- (e) 12 canales: 4 (2+2) por micro-célula.
- (f)  $3.7 \cdot 10^{-3}$ .

### **Problema 15.**

- (a) 48 canales: 16 (8+8) por célula.
- (b) No. Subir  $N$  a 4 (se necesitan más canales).
- (c)  $N = 3$ . 72 canales: 12 (6+6) por sector.
- (d) 16 canales: 4 (2+2) por microcélula.
- (e) 0.023
- (f) 32 canales: 8 (4+4) por microcélula.  
0.022

### **Problema 16.**

- (a)  $N = 4$ .
- (b)  $\gamma \geq 3.85$ .
- (c)  $N = 7$ .
- (d) 11.74 %.
- (e) Sí. Porcentaje de usuarios a  $B$ : 1.66 %.

### **Problema 17.**

- (a)  $N = 7$ .
- (b) No.
- (c)  $r_{\text{máx}} = 0.9$  Km.
- (d) 7 canales por célula *underlay*.  
 $PB_{\text{overlay}} = 2.6$  %
- (e) 1.5 %.

### **Problema 18.**

- (a)  $N = 7$ .
- (b) 98 canales: 14 (7+7) por célula.
- (c)  $r_{\text{máx}} = 0.9$  Km.
- (d) 8 (4+4) canales mini-célula.
- (e) 4 (2+2) canales mini-célula.  
 $PB = 1.15$  %.

### **Problema 19.**

- (a)  $N = 4$ .
- (b)  $CIR_{\text{max}} \approx 13.8$  dB.
- (c)  $I_{\text{adicional}} \approx 0.5$  dB.  
No depende de  $N$ .
- (d)  $I_{\text{adicional}} < 1.8$  dB.
- (e) 8 (4+4) canales mini-célula.
- (f) 24: 8 (4+4) canales por célula.

### **Problema 20.**

- (a) 42 canales: 14 (7+7) por célula.
- (b) 11.41 %.
- (c)  $\omega < 0.245$
- (d) Sí.
- (e) No.

**Problema 21.**

- (a)  $N = 7$ .
- (b)  $R_{\max} = 1.5 \text{ km}$ .
- (c)  $r < 0.75 \text{ km}$
- (d) Alternativa 1:  $\approx 4\%$   
Alternativa 2:  $\approx 6\%$ .

**Problema 22.**

- (a)  $N = 4$ .
- (b) 72 (36+36) canales.
- (c) 56%

**Problema 23.**

- (a)  $N = 4$ .
- (b)  $\alpha = 15 \text{ habitantes/km}^2$ .
- (c) 1.4%.

**Problema 24.**

- (a)  $N = 4$ ,  $PB = 0.086\%$ .
- (b)  $\gamma \geq 3.48$ .
- (c)  $N = 7$ , 3 + 3 canales adicionales
- (d) Sí, 4 + 4 canales adicionales
- (e) Alternativa 1, 1.71 dB
- (f) Sí, no hacen falta canales adicionales

**Problema 25.**

- (a)  $N = 3$
- (b)  $CIR = 12.88 \text{ dB}$ .
- (c) 3 canales
- (d) 0.0057; 0.0281; 0.0249

**Problema 26.**

- (a)  $CIR = 13.72 \text{ dB}$ .
- (b)  $\alpha \leq 32 \text{ habitantes/km}^2$
- (c) 4 canales, 88%
- (d) 0.0226

**Problema 27.**

- (a)  $36 + 36$  [ascendentes+descendentes].
- (b) Sí
- (c) 2 grupos
- (d) 3.9%

**Problema 28.**

- (a)  $N = 4$ .
- (b)  $CIR = 12.64 \text{ dB}$
- (c)  $\sigma \leq 0.32$
- (d) 4.3%

**Problema 29.**

- (a)  $N = 4$   
20 + 20 canales.
- (b)  $\gamma_{\min} = 3.108$
- (c)  $CIR = 4.86 \text{ dB}$
- (d) 4.37%

**Problema 30.**

- (a)  $N = 4$ .
- (b) 48 + 48 canales
- (c) 8.2%
- (d)  $GoS_A = 0.42\%$     $GoS_B = 3.13\%$

**Problema 31.**

- (a)  $CIR = 13.4 \text{ dB}$ .
- (b) 17.52 horas
- (c) 8.56%
- (d)  $CIR = 9.53 \text{ dB}$ .
- (e) 4.77%

**Problema 32.**

- (a)  $\gamma = 2.5965$
- (b) 12+12 canales
- (c) 8 canales
- (d) Frecuencias  $\phi, \eta, \theta$   
 $CIR = 13.4 \text{ dB}$
- (e) 2.86%

**Problema 33.**

- (a)  $N = 3$
- (b) CIR = 9.87 dB  
PB = 9.5 %
- (c) Omnidireccionales:  $N = 4$   
Sectoriales 120:  $N = 3$
- (d) Omnidireccionales: 20 canales  
Sectoriales 120: 27 canales

**Problema 34.**

- (a) GoS: 95.2 %, CIR = 11.4 dB
- (b) GoS: 87 %, CIR = 15.3 dB
- (c) 2 canales  
CIR = 7.63 dB
- (d) GoS: 92.8 %

**Problema 35.**

- (a) CIR = 8.11 dB
- (b) CIR = 17.26 dB
- (c) CIR = 3.28 dB
- (d) PB: 4.74 %

**Problema 36.**

- (a) 27 + 27 canales, PB = 1.1 %  
 $\theta = 35\%$ , CIR = 10 dB
- (b) 45 + 45 canales, PB = 0.7 %,  $\theta = 21\%$
- (c) CIR = 9.98 dB
- (d) 33 + 33 canales, PB = 2.97 %

**Problema 37.**

- (a) CIR = 10 dB  
CIR (más precisa) = 7.18 dB
- (b) 7.93 dB
- (c) PB = 2.71 %

**Problema 38.**

- (a) CIR = 10.2 dB, 12 + 12 canales
- (b) PB = 0.0251  
PB (más precisa) = 0.0346  
 $\theta_{1-6} = 0.292$ ,  $\theta_{7-9} = 0$ ,  $\theta_{10-12} = 0.357$
- (c) CIR<sub>1</sub> = 8.82 dB, CIR<sub>2</sub> = 9.97 dB
- (d) PB = 0.0252,  $\theta_{1-6} = 0.292$ ,  $\theta_{urb} = 0.488$

**Problema 39.**

- (a) CIR = 14.64 dB
- (b) CIR<sub>exacta</sub> = 14.43 dB, CIR<sub>Lee</sub> = 16 dB
- (c) PB = 3.96 %

**Problema 40.**

- (a) CIR = 12.5 dB
- (b) PB = 4.6 %
- (c) 1 canal, PB = 2.8 %. CIR no cambia
- (d) CIR = 11.53 dB
- (e) PB<sub>nu</sub> = 3.1 %, PB<sub>red</sub> = 2.95 %