



**Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica**

REPETIDORES EN SISTEMAS *CDMA PCS* (1900 MHZ)

**David Esteban Lemus Delgado
Asesorado por: Ing. Edgardo Loukota Castellanos**

Guatemala, octubre de 2003

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

REPETIDORES EN SISTEMAS CDMA PCS (1900 MHZ)

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

DAVID ESTEBAN LEMUS DELGADO

ASOSORADO POR: ING. EDGARDO LOUKOTA CASTELLANOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2003

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|--------------------------------------|
| DECANO | Ing. Sydney Alexander Samuels Milson |
| VOCAL I | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| VOCAL II | Lic. Amahán Sánchez Alvarez |
| VOCAL III | Ing. Julio David Galicia Celada |
| VOCAL IV | Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz |
| VOCAL V | Br. Elisa Yazminda Vides Leiva |
| SECRETARIO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|--------------------------------------|
| DECANO | Ing. Sydney Alexander Samuels Milson |
| EXAMINADOR | Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo |
| EXAMINADOR | Ing. Erwin Efraín Segura Castellanos |
| EXAMINADOR | Ing. Manuel Fernando Barre ra Pérez |
| SECRETARIO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

REPETIDORES EN SISTEMAS *CDMA PCS* (1900 MHZ)

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha 08 de agosto de 2002.

David Esteban Lemus Delgado

AGRADECIMIENTOS:

¡Al único Dios, nuestro Salvador, sea la gloria, la majestad, el dominio y la autoridad, por medio de Jesucristo nuestro Señor, antes de todos los siglos, ahora y para siempre!

A mis padres, Víctor Hugo y Dina Clementa, por su apoyo y amor incondicional.

A mis hermanos y amigos cercanos, por sus oraciones y apoyo moral, en especial a Mayra Rivera, Carlos y Adita Valencia y el grupo de jóvenes de mi iglesia.

Al ingeniero Edgardo Loukota Castellanos, por todo su apoyo y buena disposición para compartir sus conocimientos. Por su asesoría en la elaboración de este trabajo y en otros aspectos.

A mis compañeros de promoción, en especial a aquellos que trabajaron junto a mí los proyectos de laboratorio: Luis Fernando Pérez y Marlon Castillo.

A Telefónica Centroamérica Guatemala, por el material de apoyo proporcionado para la elaboración de este trabajo, y la asesoría de algunos ingenieros con experiencia en el campo, en especial a Alejandro Sandoval Tejeda y los compañeros de optimización.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-----|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | III |
| LISTA DE SÍMBOLOS | V |
| GLOSARIO..... | VI |
| RESUMEN | IX |
| OBJETIVOS | X |
| HIPÓTESIS..... | XI |
| INTRODUCCIÓN..... | XII |
| | |
| 1. ARQUITECTURA DE REPETIDORES EN UN SISTEMA CDMA PCS | |
| 1.1. Introducción a sistemas <i>PCS</i> | 13 |
| 1.2. Funcionamiento de un repetidor..... | 19 |
| 1.2.1. Ventajas y desventajas de los repetidores..... | 23 |
| 1.2.1.1 Ventajas | 23 |
| 1.2.1.2 Desventajas | 24 |
| 1.3. Tipos de repetidores | 25 |
| 1.3.1. Repetidores inalámbricos..... | 26 |
| 1.3.2. Repetidores interconectados por cable coaxial o fibra óptica..... | 30 |
| | |
| 2. CONFIGURACIÓN DE REPETIDORES EN UN SISTEMA CDMA PCS | |
| 2.1. Parámetros de instalación de un repetidor | 37 |
| 2.1.1. Condiciones de RF..... | 37 |
| 2.1.2. Antenas..... | 43 |
| 2.1.3. Métodos de aislamiento..... | 44 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 2.1.4. | Otros..... | 48 |
| 2.1.4.1. | Potencia de salida e intermodulación..... | 49 |
| 2.1.4.2. | Ruido..... | 50 |
| 2.1.4.3. | Repetidores en cascada | 52 |
| 2.1.4.4. | Sensibilidad..... | 54 |
| 2.1.4.5. | Tiempo de retardo..... | 55 |
| 2.2. | Balances de potencia..... | 56 |
| 2.3. | Configuración del repetidor..... | 66 |
| 2.3.1. | Potencia de recepción en antena donante | 66 |
| 2.3.2. | Pérdidas en los cables y conectores | 67 |
| 2.3.3. | Aislamiento entre antenas..... | 67 |
| 2.3.4. | Pérdidas por estructuras | 68 |
| 2.3.5. | Pruebas del repetidor..... | 69 |
| 2.4. | Consideraciones de diseño..... | 69 |
| 3. | APLICACIONES DE REPETIDORES | |
| | EN UN SISTEMA CDMA PCS | |
| 3.1. | Aplicaciones típicas de un repetidor..... | 73 |
| 3.2. | Aplicaciones de repetidores para reducción de estaciones base | 81 |
| 3.3. | Análisis de desempeño de un repetidor en un sistema CDMA PCS..... | 97 |
| 4. | ANÁLISIS DE COSTOS Y BENEFICIOS EN EL CRECIMIENTO | |
| | DE UN SISTEMA CDMA PCS UTILIZANDO REPETIDORES..... | 107 |
| | CONCLUSIONES | 114 |
| | RECOMENDACIONES..... | 116 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 117 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|----|---|-----|
| 1 | Celda con dos repetidores..... | 20 |
| 2 | Sistema de repetición..... | 21 |
| 3 | Elementos básicos de un repetidor | 22 |
| 4 | Repetidor de canal selectivo..... | 27 |
| 5 | Repetidor transparente a la red celular | 28 |
| 6 | Sistema de repetición por fibra óptica..... | 32 |
| 7 | Repetidor interconectado por fibra óptica..... | 33 |
| 8 | Aislamiento entre antenas del repetidor..... | 40 |
| 9 | Pérdidas por línea de vista | 42 |
| 10 | Aislamiento y separación vertical $S = H - h$ | 47 |
| 11 | Sistema de cero dB..... | 53 |
| 12 | Nivel de recepción (enlace descendente)..... | 58 |
| 13 | Nivel de recepción (enlace ascendente)..... | 59 |
| 14 | Uso de la fórmula de pérdida disponible..... | 63 |
| 15 | Posicionamiento del repetidor | 71 |
| 16 | Repetidor en edificio de tres pisos | 75 |
| 17 | Repetidores en extensión de rango | 82 |
| 18 | Extensión de área | 83 |
| 19 | Cobertura por dispersión..... | 84 |
| 20 | Extensión de rango sin antena trasera | 86 |
| 21 | Extensión de rango con dos sectores..... | 87 |
| 22 | Repetidores en cascada para extensión de rango | 88 |
| 23 | Niveles de recepción con la estación base original..... | 99 |
| 24 | Niveles de transmisión con la estación base original..... | 100 |

| | | |
|----|---|-----|
| 25 | Niveles de recepción con el repetidor | 102 |
| 26 | Niveles de transmisión con el repetidor | 103 |
| 27 | Niveles de error con la estación base original..... | 104 |
| 28 | Niveles de error con el repetidor..... | 105 |

TABLAS

| | | |
|------|--|-----|
| I | Condiciones de RF | 38 |
| II | Balance de potencias para el nivel de recepción en la estación móvil | 58 |
| III | Ídem. para el nivel de recepción en la estación base | 60 |
| IV | Ídem. del enlace descendente – uso de la fórmula de pérdida disponible..... | 65 |
| V | Ídem. del enlace ascendente sin repetidor para el edificio de tres pisos | 76 |
| VI | Ídem. del enlace descendente sin repetidor para el edificio de tres pisos | 77 |
| VII | Ídem. del enlace ascendente con repetidor para el edificio de tres pisos | 79 |
| VIII | Ídem. del enlace descendente con repetidor para el edificio de tres pisos | 80 |
| IX | Ídem. del enlace ascendente para los repetidores en cascada en extensión de rango..... | 95 |
| X | Ídem. del enlace descendente para los repetidores en cascada en extensión de rango..... | 96 |
| XI | Presupuesto para la instalación de una nueva estación base..... | 109 |
| XII | Presupuesto para la instalación de un repetidor..... | 110 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------|----------------------|
| $\%$ | Porcentaje |
| $\$$ | Dólar estadounidense |
| λ | Longitud de onda |
| π | Número pi |

GLOSARIO

| | |
|-----------------------------|--|
| ACU | <i>Alarm Control Unit</i> – Unidad de control de alarma. Dispositivo utilizado para el control local y remoto de repetidores. |
| Aislamiento | Se refiere al grado en el cual las señales entre las antenas del repetidor operando en la misma frecuencia son atenuadas. Usualmente se expresa en dB. |
| AMPS | <i>American Mobile Phone System</i> – Sistema americano de telefonía móvil. Sistema de telefonía celular de acceso analógico también conocido como “sistema celular” o “sistema análogo”. |
| Antena de servicio | Antena a través de la cual el repetidor transmite la señal amplificada de la estación base donante hacia los suscriptores móviles. Por esta razón también se le llama “antena suscriptora”. |
| Antena donante | Antena a través de la cual el repetidor se comunica con la estación base donante. |
| Antena suscriptora | Veáse “antena de servicio”. |
| Balance de potencias | Término utilizado para describir los niveles de señal y otras características que se requieren para poner en servicio una estación base o repetidor. Usualmente especifica las ganancias y pérdidas en los enlaces ascendente y descendente. |

| | |
|------------------------------|---|
| CDMA | <i>Code Division Multiple Access</i> – Acceso múltiple por división de código. Tecnología de acceso digital que asigna códigos ortogonales a cada usuario. |
| Celda | Área de cobertura de una estación base. A veces se refiere a la estación base en sí. |
| Enlace ascendente | Es la trayectoria en un sistema celular o <i>PCS</i> que va desde la estación móvil hacia la estación base. También se le conoce como enlace o sentido reverso. |
| Enlace descendente | Es la trayectoria en un sistema celular o <i>PCS</i> que va desde la estación base hacia la estación móvil. También se le conoce como enlace o sentido directo. |
| Enlace directo | Véase “enlace descendente”. |
| Enlace reverso | Véase “enlace ascendente”. |
| Estación base | Es un punto de transmisión y recepción del sistema en una red inalámbrica celular o <i>PCS</i> . |
| Estación base donante | Estación base dentro de la red celular del sistema por la cual el repetidor toma la señal de enlace descendente, y a la cual el repetidor transmite la señal de enlace ascendente. |
| Estación móvil | Se le conoce así al dispositivo utilizado por el usuario o suscriptor, dentro del sistema de una red inalámbrica celular o <i>PCS</i> . A veces se utiliza el término “unidad móvil”. |
| FDMA | <i>Frequency Division Multiple Access</i> – Acceso múltiple por división de frecuencia. Tecnología de acceso analógico que asigna anchos de banda distintos a cada usuario. |
| GSM | <i>Global System for Mobile Communications</i> – Sistema global para comunicaciones móviles. Tecnología que utiliza <i>TDMA</i> en sistemas <i>PCS</i> y en sistemas celulares. |

| | |
|---------------------|---|
| LNA | <i>Low Noise Amplifier</i> – Amplificador de bajo ruido. Amplificador diseñado para exhibir la más mínima figura de ruido posible, en todo su rango de operación. |
| LOS | <i>Line Of Sight</i> – Línea de vista. Término utilizado para describir la capacidad de observar un sitio donante desde un sitio de repetición. |
| PCS | <i>Personal Communication Services</i> – Servicios de comunicación personal. Una nueva generación de tecnología inalámbrica, que introduce un rango de características y servicios, que superan aquellos disponibles en los sistemas de telefonía con tecnologías celulares analógicas o digitales. |
| PDA | <i>Programmable Digital Attenuator</i> – Atenuador digital programable. Dispositivo utilizado para ajustar en el repetidor, la ganancia del enlace ascendente y descendente a determinado valor. |
| RF | Radiofrecuencia. |
| SNR | <i>Signal to Noise Ratio</i> – Relación de señal a ruido. Relación entre la potencia de las señal con respecto a la potencia del ruido. |
| TDMA | <i>Time Division Multiple Access</i> – Acceso múltiple por división de tiempo. Tecnología de acceso digital que asigna compuertas de tiempo distintas a cada usuario. |
| UMTS | <i>Universal Mobile Telecommunication System</i> – Sistema universal de telecomunicaciones móviles. Sistema digital avanzado de telefonía móvil, actualmente, en fase de especificación. |
| Unidad móvil | Véase “estación móvil”. |

RESUMEN

CDMA es una de las tecnologías de acceso más utilizadas en la actualidad por operadores de *PCS*, así como también por operadores de telefonía celular en bandas no pertenecientes a *PCS*. Un sistema *CDMA PCS* puede estar formado por una red híbrida de repetidores. En dicha red pueden encontrarse diferentes tipos de repetidores utilizados en diversas aplicaciones.

Un repetidor es en sí un amplificador bidireccional, que amplifica y retransmite las señales del enlace ascendente y descendente del sistema, para ajustar la potencia de RF hacia una zona de interés, que no posea cobertura. La señal original es tomada de una estación base donante por medio de una antena, o bien, por fibra óptica o cable coaxial.

Las aplicaciones típicas de un repetidor permiten la solución de algunos problemas de cobertura, rellenando agujeros de RF en exteriores o interiores. Las aplicaciones más recientes de los repetidores permiten una reducción significativa de estaciones base, y por consiguiente, el crecimiento de la red celular del sistema.

El diseño de una red híbrida de repetidores en un sistema *CDMA PCS* toma en cuenta todos los factores de calidad del sistema, así como también ciertas condiciones de RF necesarias para el funcionamiento adecuado de cada repetidor. Tales condiciones, así como también otros parámetros de instalación deben estudiarse detenidamente para la configuración de cada repetidor dentro del sistema. Al utilizar repetidores en un sistema *CDMA PCS* puede obtenerse una reducción significativa de costos en el crecimiento de la red celular y en la solución de algunos problemas de cobertura.

OBJETIVOS

◆ General

Investigar el funcionamiento, configuración y las diferentes aplicaciones de un repetidor en un sistema *CDMA PCS* (1900 MHz); realizando un análisis real del desempeño de un repetidor, y un análisis de costos y beneficios al utilizar repetidores en el crecimiento de una red de telefonía celular.

◆ Específicos

1. Describir el funcionamiento interno de un repetidor.
2. Conocer los parámetros de configuración que se tomarán en cuenta en la instalación de un repetidor en un sistema *CDMA PCS*.
3. Conocer los diferentes tipos de repetidores que pueden existir en un sistema *CDMA PCS*, sus aplicaciones y configuración.
4. Realizar un análisis real del desempeño de un repetidor en un sistema *CDMA PCS*, por medio de experimentación e investigación de campo.
5. Realizar un análisis de costos y beneficios para el crecimiento de una red de telefonía celular *CDMA PCS* (1900 MHz), utilizando repetidores.
6. Determinar si es posible realizar una reducción significativa de estaciones base en un sistema *CDMA PCS*, por medio de la utilización de repetidores.

HIPÓTESIS

Los repetidores en un sistema *CDMA PCS* tienen múltiples aplicaciones. Comúnmente se han utilizado para rellenar agujeros de RF y proveer cobertura en interiores. En general, los repetidores podrían utilizarse para extender el rango de cobertura (principalmente en carreteras), para proveer cobertura por dispersión a pueblos pequeños y otras aplicaciones más recientes, que pueden permitir una reducción del 40% al 60% de estaciones base. Esto quiere decir, que mediante las distintas aplicaciones de los repetidores en un sistema *CDMA PCS*, se podría obtener en realidad una reducción significativa de celdas, sustituyendo algunas ya existentes por repetidores, o instalando un repetidor en vez de una nueva celda. Por consiguiente, se podría también realizar una reducción de costos significativa en el crecimiento de una red de telefonía celular, utilizando repetidores en sus diferentes aplicaciones.

INTRODUCCIÓN

Los proveedores de *PCS* deben brindar un acceso transparente al mundo de las comunicaciones modernas. Sus clientes solamente ven el microteléfono y desconocen la tecnología y la amplia infraestructura, que son necesarias para proporcionar una cobertura costo-efectiva a lo largo de toda la red.

Un repetidor en un sistema *CDMA PCS* proporciona una forma de adaptar la cobertura para llenar áreas de señal nula específicas, dentro del área de servicio de una estación base, o bien, fuera de dicha área, extendiendo el rango de cobertura de la estación base.

La utilización de repetidores en un sistema *CDMA PCS* puede permitir una reducción significativa de costos, en la solución a ciertos problemas de cobertura, o bien, en el crecimiento de la red celular del sistema. Sin embargo, el diseño de una red híbrida de repetidores, toma en cuenta todos los factores de calidad del sistema y por consiguiente, el diseño del mismo. No se pueden dar conclusiones acerca del desempeño de un repetidor en forma aislada. Se deben estudiar los parámetros de configuración de la estación base donante y las estaciones base cercanas al sistema de repetición.

Esta es la razón por la cual en una red híbrida de repetidores se deben estudiar todos los parámetros de instalación y configuración de cada repetidor, de acuerdo con su respectiva aplicación, conociendo también las características y funcionamiento de cada repetidor dentro del sistema.

1. ARQUITECTURA DE REPETIDORES EN UN SISTEMA *CDMA PCS*

1.1 Introducción a sistemas *PCS*

Un sistema de servicios de comunicaciones personales (*PCS*), comprende un amplio rango de servicios, que más allá de la movilidad, permiten al usuario disponer de una conexión inalámbrica con un identificador único; independientemente del terminal utilizado, el lugar, la hora y el tipo de información que se desee transmitir o recibir.

Existen diversas definiciones de un sistema *PCS*, provenientes de distintas organizaciones internacionales. Según la comisión federal de las comunicaciones (*FCC*), el organismo regulador de las telecomunicaciones en Estados Unidos, *PCS* se define como “un sistema por el cual cada usuario puede intercambiar información con cualquier otra persona, en cualquier momento, en cualquier lugar, a través de cualquier tipo de dispositivo, utilizando un único número de telecomunicación personal.”

Por otro lado, la asociación de la industria de las telecomunicaciones (*TIA*), define *PCS* como “un conjunto de capacidades que permite algunas combinaciones de servicios de movilidad terminal y movilidad personal.”

El instituto nacional americano de estándares (*ANSI*), por su parte, define *PCS* como “un conjunto de capacidades que permiten alguna combinación de movilidad terminal, movilidad personal y manejo del perfil del servicio.”

Las definiciones anteriores, convergen hacia el mismo concepto, cuyas características más relevantes son: la integración de la radiolocalización, la telefonía móvil y la telefonía local inalámbrica dentro de una nueva generación de telefonía celular digital, con la utilización de un único terminal, un único número de identificación para el usuario y facilidades de interconexión tanto a la red pública como a otras redes inalámbricas, sin limitaciones del lugar u hora para la utilización de cualquier servicio de comunicaciones.

PCS es entonces, una nueva generación de tecnología inalámbrica que introduce un rango de características y servicios, que superan aquellos disponibles en los sistemas de telefonía con tecnologías celulares analógicas o digitales.

Una de las principales características de un sistema *PCS* es, que a diferencia de las tecnologías celulares analógicas o digitales (800 MHz), este debe operar en la banda de frecuencias de 1900 MHz. Los métodos de acceso por utilizar pueden ser *CDMA* o *TDMA*, definidos por los estándares *IS-95* e *IS-136* respectivamente.

Por consiguiente, si se habla de un “Sistema *CDMA PCS*”, se refiere específicamente a un sistema *PCS* que utiliza *CDMA* como método de acceso y opera en la banda de frecuencias de 1900 MHz.

Antes de definir y ver las diferencias existentes entre *CDMA* y *TDMA*, véase el funcionamiento de una red de telefonía inalámbrica en general.

Un sistema de telefonía inalámbrica, está compuesto por una central telefónica y una red de estaciones base que se comunican con dicha central. La central telefónica está interconectada a otros sistemas de telecomunicaciones, permitiendo así la comunicación de un usuario del sistema con otras redes.

El usuario se comunica con la central telefónica a través de la estación o estaciones base más cercanas, utilizando un único medio de transmisión para recibir y transmitir la información: la interfaz de aire estándar (enlace de radio).

A las dos rutas o sentidos, transmisión y recepción, se les conoce como enlace directo (enlace descendente – *downlink*) y enlace reverso (enlace ascendente – *uplink*). Las señales en el enlace directo se transmiten desde la estación base hacia la estación móvil, y las señales en el enlace reverso se transmiten desde la estación móvil hacia la estación base.

El área de servicio de cada estación base es llamada celda, y cada celda es dividida en dos o tres sectores, a fin de que la interferencia sea menor en todo el sistema, y éste tenga mayor capacidad y calidad. Estos dos términos son muy importantes en un sistema de telefonía inalámbrica, al igual que en un sistema *CDMA PCS*.

La capacidad es definida como el número total de usuarios simultáneos, que el sistema puede soportar, y la calidad se define como la condición percibida del enlace de radio asignado para un usuario particular. La calidad percibida en el enlace de radio está directamente relacionada con la probabilidad de error de *bit*.

Además de la capacidad y calidad, deben considerarse dos procesos muy importantes, estos son: control de potencia y *handoff*.

El control de potencia es el proceso de regulación automática de potencia entre la unidad móvil y la estación base de servicio, de modo que todas las transmisiones del sistema, operen con el mínimo de potencia requerido y no introduzcan mayor interferencia.

La potencia de la estación base, es controlada y regulada para no introducir interferencia en otras unidades móviles, que no estén dentro de su área de servicio, y la potencia de la unidad móvil es controlada y regulada para que no introduzca mayor interferencia a otras estaciones base, que puedan estar comunicándose con otros usuarios.

Handoff es el proceso que se produce cuando la unidad móvil cambia de celda o sector de servicio.

Como ya se mencionó anteriormente, un sistema *PCS* puede utilizar tecnologías de acceso, tales como *CDMA* o *TDMA*.

CDMA es una tecnología de acceso múltiple, basada en la reutilización del radio espectro, por medio de técnicas de secuencia directa en un espectro expandido, que permiten la separación de señales que son coincidentes en tiempo y frecuencia, por medio de códigos ortogonales.

La energía de la señal de cada estación móvil, es distribuida sobre todo el ancho de banda y codificada de tal manera, que la señal sea única para cada usuario. Cada señal es identificada y demodulada en el receptor aplicando réplicas de cada código usado en cada señal. Este proceso hace resaltar la señal de interés mientras disminuye las otras señales de interferencia. Este nivel de interferencia o ruido, se incrementa con el número de estaciones móviles percibidas por la estación base; al igual que con el número de estaciones base, percibidas por la estación móvil.

Puesto que se requiere un valor mínimo de relación señal a ruido (*SNR*) para asegurar la calidad de la llamada, el nivel total de interferencia limita la capacidad del sistema; por consecuencia, todas las transmisiones son controladas cuidadosamente, de tal manera que operen con el mínimo de potencia requerido.

En contraste con el concepto de *CDMA* existen otras tecnologías de acceso múltiple. En el acceso múltiple por división de frecuencia, *FDMA*, cada usuario tiene uso total de una parte del radio espectro. El radio espectro asignado se divide en un número de anchos de banda angostos llamados canales. El ancho de este canal depende del sistema de comunicaciones. Por ejemplo, en *AMPS* se usan canales de 30 KHz, en contraste con *NAMPS*, donde se utilizan canales de 10 KHz. La energía de la señal de cada usuario es asignada a un canal. Las señales coincidentes en tiempo, son distinguidas unas de otras usando filtros selectivos de frecuencia.

En el acceso múltiple por división de tiempo, *TDMA*, cada estación móvil utiliza parte del tiempo del espectro asignado (30 KHz). Este espectro asignado es dividido en un número de ranuras de tiempo. La energía de la señal de cada usuario es asignada a una ranura de tiempo específica. Las señales coincidentes en frecuencia son distinguidas unas de otras por compuertas de tiempo. Tanto *TDMA* como *CDMA* son tecnologías digitales, en cambio, *FDMA* es una tecnología analógica.

En el acceso múltiple por división de código, *CDMA*, cada estación móvil tiene acceso completo a todo el espectro asignado. La energía de cada señal es distribuida sobre todo el ancho de banda, este es de 1.25 MHz. Las señales coincidentes en tiempo y frecuencia son distinguidas unas de otras, por medio del uso de códigos únicos para cada señal (códigos ortogonales).

Se han visto ya algunos aspectos técnicos de un sistema *CDMA PCS*. Ahora bien, desde un punto de vista comercial, los operadores de *PCS* deben brindar un acceso transparente al mundo de las comunicaciones modernas. Los clientes solamente ven la unidad móvil, y desconocen la tecnología y la amplia infraestructura, que es necesaria para proporcionar una cobertura costo-efectiva a lo largo de toda la red.

Con la aparición de los primeros *PCS*, se instaló una nueva y alarmante "regla de oro" en los procedimientos de diseño de sistemas de comunicaciones. De acuerdo con esta regla de oro, se requiere una relación de celdas *PCS* de tres o cuatro a una para proporcionar la cobertura de una celda de 800 MHz. Esto quiere decir, que tres o cuatro celdas *PCS* (1900 MHz) son necesarias para proporcionar la cobertura de una celda de 800 MHz. Dicho requerimiento dificulta la tarea de brindar un servicio *PCS* costo-efectivo.

En un sistema *PCS* pueden encontrarse desde macro celdas hasta pico celdas, y últimamente se habla de "redes híbridas de repetidores" que consisten en redes de telefonía celular que incluyen estaciones base y repetidores utilizados en múltiples aplicaciones.

El diseño de una red híbrida de repetidores en un sistema *PCS* toma en cuenta todos los factores de calidad del sistema, así como también ciertas condiciones de RF (radio frecuencia) necesarias para el funcionamiento adecuado de un repetidor.

Por esto mismo, en este capítulo se han introducido los conceptos básicos de *CDMA*, como un vistazo general que permita la comprensión del funcionamiento de un sistema *CDMA PCS* con repetidores.

1.2 Funcionamiento de un repetidor

Un repetidor es en sí un amplificador bidireccional, que opera de una manera muy similar a otros elementos transreceptores en un sistema de comunicación de radio frecuencias: recibe RF en una puerta y transmite RF por otra puerta. A los repetidores se les conoce como amplificadores bidireccionales, debido a que están compuestos por dos amplificadores colocados en direcciones opuestas, con las entradas y salidas combinadas y orientadas por elementos direccionales.

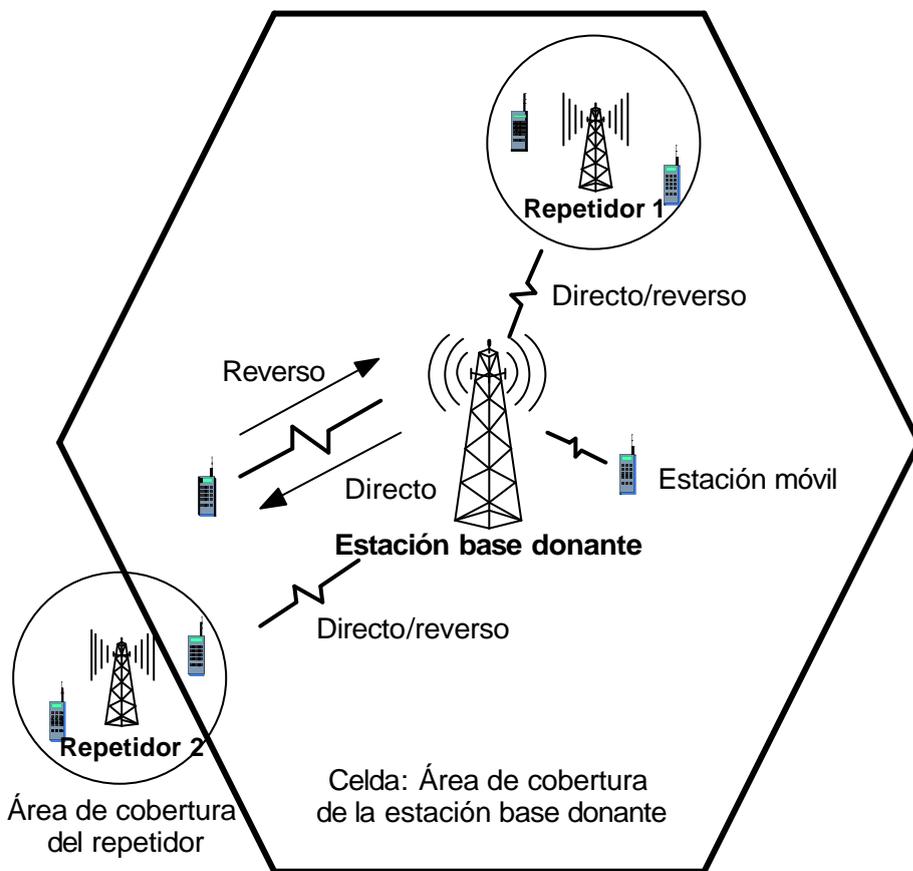
El objetivo último de un amplificador bidireccional o repetidor, es ajustar la potencia de RF hacia una zona de interés que no está cubierta por la estación base. Es claro que el término "bidireccional" significa que el amplificador procesa la señal de RF tanto en el sentido de transmisión como en el de recepción.

Desde luego, interesan las características de propagación de la trayectoria en ambos sentidos. Un repetidor, entonces, proporciona una forma de adaptar la cobertura en regiones no cubiertas dentro o fuera del área de servicio de una estación base. Esto lo hace retransmitiendo la señal desde la estación base hacia el usuario (estación móvil), que se encuentra fuera del área de servicio, amplificando la señal en el enlace directo; a la vez que retransmite y amplifica la señal en el enlace reverso, desde el usuario hacia la estación base.

A la estación base, que proporciona la señal al repetidor se le llama: estación base donante. Cuando uno o más usuarios se encuentran dentro del área de servicio del repetidor, la estación base donante presta los canales de tráfico necesarios y disponibles, para cada usuario.

La siguiente figura muestra el modelo del sistema de una celda con dos repetidores. Un repetidor se encuentra dentro del área de servicio de la estación base donante, mientras que el otro se encuentra fuera de ésta.

Figura 1. Celda con dos repetidores

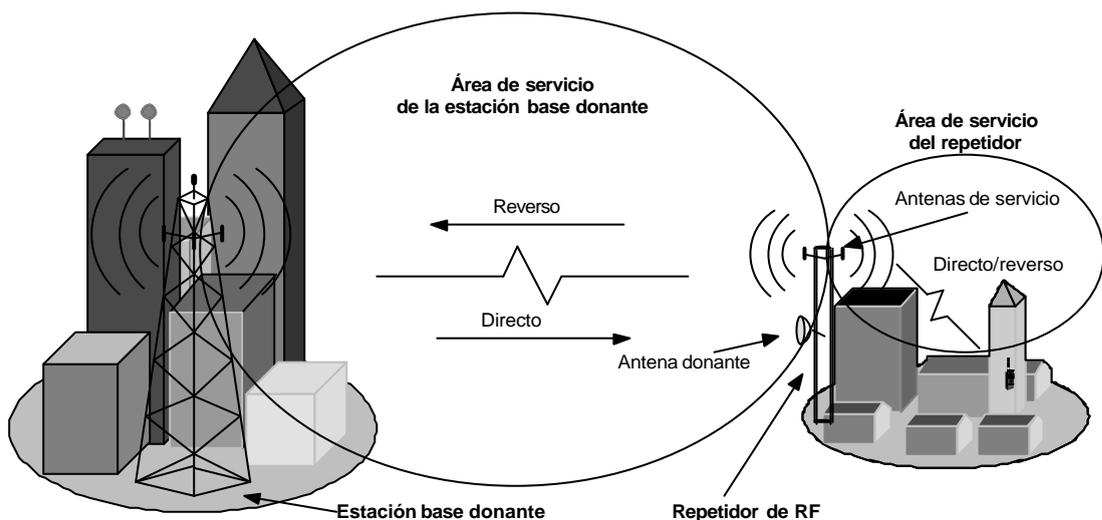


Los repetidores se comunican con la estación base donante, para dar cobertura a la zona de interés, dentro o fuera de la celda. Los móviles en el área de cobertura de un repetidor, se comunican con la estación base donante a través del repetidor. Los móviles fuera del área de cobertura del repetidor se comunican en forma directa con la estación base.

Como se verá más adelante, existen diferentes tipos de repetidores, que se pueden utilizar en un sistema *CDMA*, así como también, diferentes aplicaciones para cada tipo de repetidor. Sin embargo, el principio de funcionamiento de un repetidor es igual para los diferentes tipos que puedan existir, y en general, para sus diferentes aplicaciones.

La siguiente figura muestra el modelo de un sistema de repetición, con un repetidor de RF.

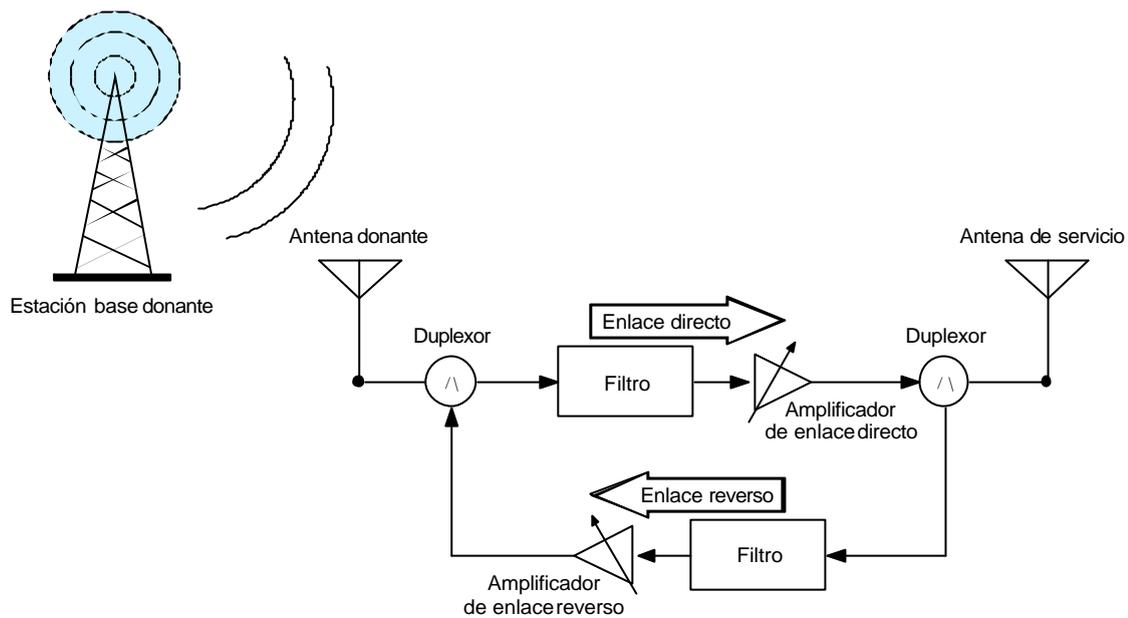
Figura 2. Sistema de repetición



El repetidor, como se dijo anteriormente, es un amplificador que opera en los dos sentidos, en el enlace directo y en el enlace reverso. El enlace directo está dado por el trayecto celda-repetidor-móvil, y el enlace reverso por el trayecto móvil-repetidor-celda.

Para analizar el principio de funcionamiento del sistema, véase la siguiente figura que muestra en detalle los elementos básicos de un repetidor.

Figura 3. Elementos básicos de un repetidor



El principio de funcionamiento del sistema de repetición es el siguiente: el repetidor toma la señal de repetición de la estación base donante. La señal es recibida por una antena denominada “antena donante”. El repetidor filtra la señal en el enlace directo, la amplifica y la retransmite por medio de una antena llamada “antena de servicio”, de tal forma que el móvil que requiera el servicio pueda recibir la señal y transmitirla vía el enlace reverso hacia la antena de servicio nuevamente. A las antenas de servicio también se les conoce como “antenas suscriptoras”, porque los móviles están suscritos a éstas en el área de cobertura del repetidor.

En el enlace reverso, el repetidor recibe la señal del móvil, filtrándola y amplificándola, para luego retransmitirla hacia el sector donante de la celda, a través de su antena donante. De esta manera se lleva a cabo una transmisión bidireccional, que permite la comunicación de un usuario dentro del área de servicio del repetidor, con la estación base donante.

1.2.1 Ventajas y desventajas de los repetidores

Como es de esperarse, existen tanto ventajas como desventajas al utilizar repetidores en un sistema *CDMA PCS*. Tomando en cuenta que existen también diferentes tipos de repetidores, las ventajas y desventajas que se presentan a continuación se aplican a los diferentes tipos de repetidores, independientemente de algunas ventajas o inconvenientes que existan entre estos mismos.

1.2.1.1 Ventajas

Utilizando repetidores en un sistema CDMA se obtienen las siguientes ventajas:

1. Reducción de costos: los repetidores son utilizados como relevos de una estación base, cuando económicamente hablando, la instalación de una nueva estación base sea inconveniente. Un repetidor puede ser hasta diez veces menos costoso que una estación base.

2. Solución a problemas de cobertura: los repetidores son una buena opción para dar solución a algunos problemas de cobertura en un sistema *CDMA*. Pueden ser utilizados en diferentes aplicaciones, aumentando considerablemente la cobertura de la estación base donante.
3. Facilidad de instalación: la instalación de un repetidor es más simple y rápida. La adquisición del lugar de instalación es más sencilla. En la mayoría de los casos, el repetidor no requiere de una conexión física de transmisión o enlace de microonda.
4. Reducción de costos de mantenimiento: el consumo de electricidad es menor. Muchas funciones de operación y mantenimiento pueden realizarse remotamente.

1.2.1.2 Desventajas

Deben considerarse las siguientes desventajas de los repetidores en un sistema *CDMA*:

1. Reducción de la capacidad: como los repetidores no disponen de canales propios de tráfico, pueden aumentar la cobertura de una celda, pero no su capacidad.
2. Falta de gestión: los repetidores no se comunican directamente con la central, por lo que no pueden realizar tareas especiales.

3. El diseño del enlace es más complicado: la configuración de un repetidor requiere ciertas condiciones de RF, tales como el aislamiento entre antenas del repetidor, línea de vista directa con la estación base donante y otras, que en algunos casos, son difíciles de obtener.
4. Falta de estadísticas: los repetidores no pueden generar estadísticas de llamadas caídas (llamadas que se cortan), bloqueos y otros factores de calidad.

1.3 Tipos de repetidores

Se ha visto ya, que el principio de funcionamiento de un repetidor no es más que amplificar y retransmitir la señal en las dos vías: el enlace directo y el enlace reverso. Como se verá en el siguiente capítulo, los repetidores en un sistema *CDMA* tienen diferentes aplicaciones, y estas aplicaciones requieren distintos parámetros de configuración e instalación, así como también, la utilización de diferentes tipos de repetidores.

Los repetidores se pueden categorizar por el medio de transmisión utilizado en el enlace de la estación base al repetidor, estas categorías son: repetidores inalámbricos y repetidores interconectados por fibra óptica o cable coaxial.

1.3.1 Repetidores inalámbricos

Los repetidores inalámbricos son aquellos que toman la señal de la estación base donante, mediante la interfaz de aire estándar. La señal se toma “sobre aire”, directamente de la estación base, que provee el servicio al repetidor, por medio de una antena donante. A los repetidores inalámbricos también se les conoce como “repetidores sobre aire” o simplemente como “repetidores de RF”.

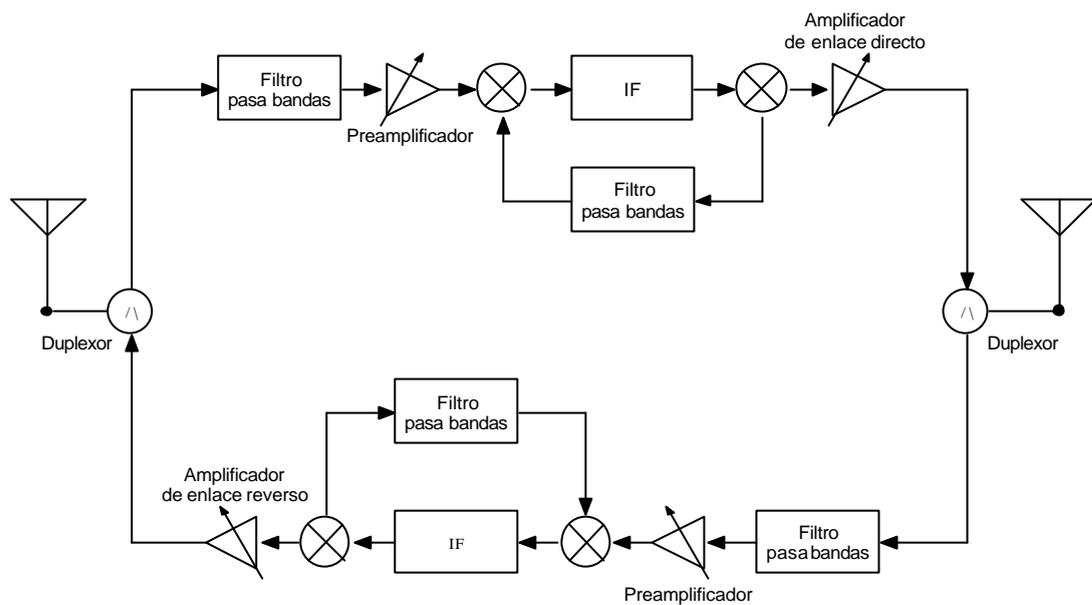
Un repetidor sobre aire (*over the air repeater*) toma la señal de RF de la estación base donante por medio de su antena donante. La señal de RF es filtrada, amplificada y retransmitida en los dos sentidos, utilizando el mismo medio de transmisión.

Existen en el mercado dos grandes categorías de repetidores de RF para sistemas *CDMA*, los de banda selectiva y los de canal selectivo, cuyo uso depende de la aplicación que se les quiera dar. En general, un repetidor de canal selectivo retransmite las señales de los canales de trabajo únicamente, mientras que un repetidor de banda selectiva, retransmite todos los canales existentes en la banda indicada.

Los repetidores de canal selectivo son utilizados en lugares donde es necesaria una gran selectividad, debido a altas interferencias. Las ventajas de este repetidor es que solo amplifica los canales deseados, proporcionando altas potencias de salida. Sus desventajas son que debe tener un número de canales idéntico al de las portadoras de la celda donante, exige una señal donante adecuada y también es sensible a los movimientos de antenas en la celda donante.

La siguiente figura muestra un repetidor de canal selectivo en general.

Figura 4. Repetidor de canal selectivo

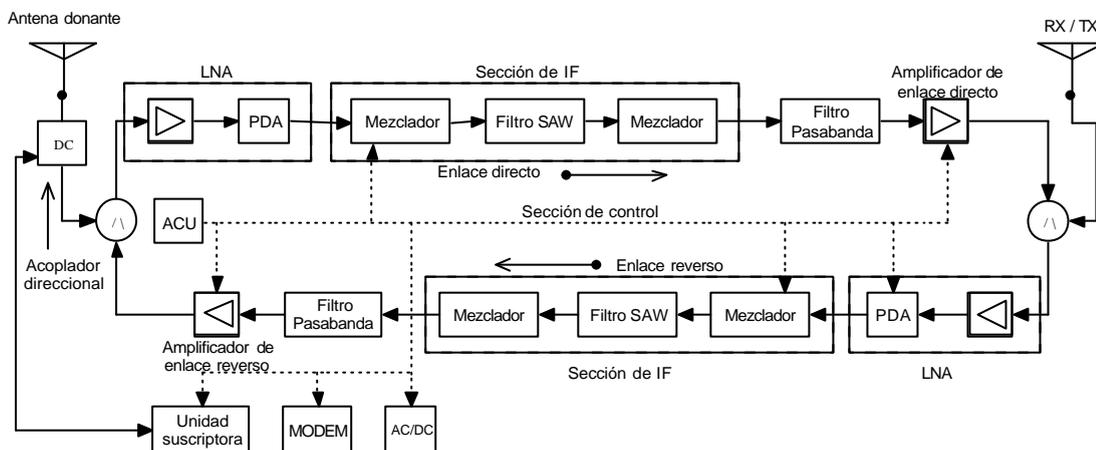


La señal pasa a través de los filtros, pasa bandas y luego es convertida a una frecuencia intermedia, seleccionando el canal que se desea amplificar.

Los repetidores incluyen también circuitos de control y protección. Los circuitos de control permiten la programación y configuración de alarmas, así como los ajustes de ganancia y selección de canales de frecuencia. Los circuitos de protección se utilizan para prevenir daños al repetidor, regulando automáticamente la potencia de los amplificadores o previniendo la oscilación del sistema.

Para analizar detalladamente el funcionamiento de un repetidor de canal selectivo, la siguiente figura muestra el diagrama en bloques de un repetidor, transparente a la red celular. Es decir, un repetidor que no traslade los canales de tráfico o control a otra frecuencia; no alterara la señal de ninguna manera, excepto para amplificación.

Figura 5. Repetidor transparente a la red celular



El repetidor toma la señal de la estación base a través de su antena donante. La señal pasa a través de un duplexor de RF que permite la recepción y transmisión de la señal en los dos sentidos. El duplexor puede contener un filtro pasa bandas para el ancho de banda de RF deseado. Filtrada la señal, es enviada hacia un amplificador de bajo ruido (*LNA*).

Después, la señal pasa a través de un circuito de protección. Este puede ser un atenuador digital programable (*PDA*), que proteja al repetidor de sobrecarga y que a su vez, pueda ser utilizado para ajustar la ganancia del enlace directo.

Un mezclador de frecuencias intermedias (*IF*) convierte la señal de RF a una frecuencia intermedia de 85 MHz. Después de la conversión a la frecuencia intermedia, la señal pasa a través de un filtro SAW. La banda de paso de este filtro es de 1.25 MHz (ancho de banda requerido por una señal de CDMA). Otro mezclador de *IF* convierte la señal de 85 MHz a la radio frecuencia original, pasando después por un filtro pasa bandas. Este filtrado elimina cualquier otra señal que se encuentre fuera del ancho de banda utilizado.

Filtrada la señal, es pasada finalmente a través de un amplificador de potencia (para el enlace directo). Después de ser amplificada la señal, pasa a través de un duplexor que envía la señal a la antena de servicio. Este duplexor permite también la transmisión y recepción de la señal en los dos sentidos.

De la misma manera que en el enlace directo, la señal en el enlace reverso es pasada a través de un duplexor, un LNA, la sección de frecuencias intermedias, un filtro pasa banda y finalmente, el amplificador de potencia (para el enlace reverso).

El repetidor puede contener también una sección encargada del monitoreo y programación de las ganancias, banda de frecuencias y otras funciones, como se muestra en la figura anterior mediante las líneas punteadas.

Este repetidor dispone de una sección encargada del monitoreo y control de alarmas (ACU). Esta sección, detecta, procesa y archiva todas las alarmas de fallas generadas en el repetidor. De igual manera, esta sección puede controlar las funciones, tales como la ganancia de los amplificadores de potencia y la programación del canal de frecuencias en el filtro de *IF*.

La programación y monitoreo del *ACU* se realizan por medio de una interfase serial a una computadora. El reporte de alarmas y estado del repetidor se puede obtener por medio de una conexión vía módem, utilizando una línea telefónica fija o un teléfono móvil instalado a través de un acoplador, a la antena donante.

En este caso, debido a que el repetidor no lleva a cabo un traslado de frecuencias para los canales de tráfico o control, el repetidor recibe y transmite la misma señal. Esto quiere decir, que como en cualquier otro sistema que transmita la misma señal que recibe, se puede producir un estado de oscilación en el repetidor. Por esto mismo, la mayoría de los repetidores disponibles en el mercado tienen un mecanismo de protección, previniendo o cancelando la oscilación del repetidor. Sin embargo, la oscilación se puede prevenir, manteniendo un buen aislamiento entre las antenas donantes y de servicio. El aislamiento no es más que la separación, en dB, existente entre la antena donante y la antena de servicio del repetidor, y como se verá más adelante, es una condición necesaria para el buen funcionamiento de un repetidor.

1.3.2 Repetidores interconectados por cable coaxial o fibra óptica

Un repetidor también puede utilizar medios físicos de transmisión como el cable coaxial o la fibra óptica. En general, el principio de funcionamiento del sistema es el mismo para cualquier medio de transmisión. En este caso, se puede utilizar cable coaxial o fibra óptica para llevar la señal de RF de la estación base hacia el repetidor, para que éste pueda retransmitirla.

El uso de la fibra óptica como medio de transmisión lleva consigo una serie de importantes ventajas:

1. Baja atenuación:

Frente a los 0.7 dB/m de un cable coaxial convencional, la fibra tiene unas pérdidas de 0.4 dB/km, es decir, casi unas 1000 veces menos. Esto permite transportar las señales a grandes distancias sin el uso de repetidores intermedios, los cuales son necesarios en el caso del cable coaxial, con el consiguiente aumento de costos.

2. Inmunidad a interferencias electromagnéticas:

La fibra emplea luz emitida por un láser para la comunicación, por lo que no es afectada por radiaciones electromagnéticas. Esto es especialmente ventajoso para el cableado de edificios, ya que permite usar las canalizaciones existentes ocupadas habitualmente por cables de teléfono, coaxiales, líneas de fuerza, etc. De esta manera, se pueden tender los cables de fibra con la seguridad de que no se verán afectados por el resto de las comunicaciones.

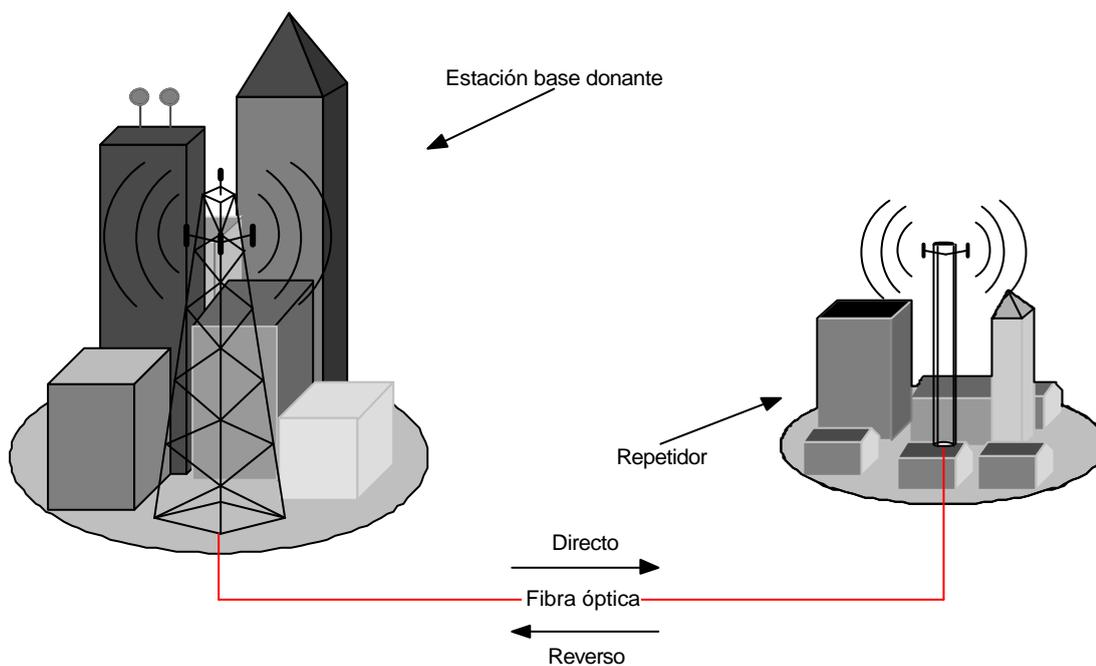
3. Gran ancho de banda :

El ancho de banda (relacionado con la capacidad de transporte de información) de una fibra, es miles de veces superior al de un cable coaxial. En la fibra se pueden transportar todos los estándares de telefonía móvil empleados en la actualidad (*TDMA-900*, *GSM*, *DCS-1800*, *CDMA*, *DECT*, etc.) y los que se usarán en un futuro próximo (*UMTS*).

Una de las desventajas de la utilización de la fibra óptica como medio de transmisión es, que la fibra tiene que ser dedicada. Esto quiere decir, que debido al ancho de banda por utilizar, no se podría compartir la fibra óptica con otro tipo de servicio.

Considerando las ventajas de la fibra óptica sobre el cable coaxial, véase a continuación un sistema de repetición de RF sobre fibra óptica. La siguiente figura muestra un repetidor interconectado por fibra óptica.

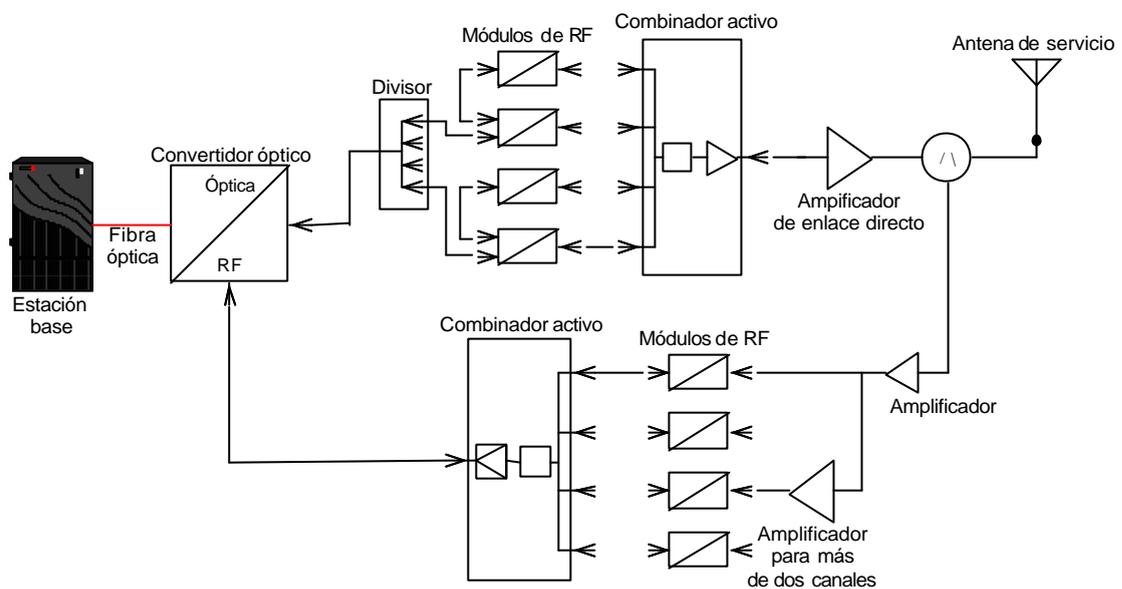
Figura 6. Sistema de repetición por fibra óptica



Los repetidores interconectados por fibra óptica, toman la señal de la celda donante mediante una interfaz óptica. Estos repetidores transportan las señales de radio frecuencia por medio de la fibra, desde una única celda donante, hacia todos los puntos donde es necesario distribuir la señal.

Para analizar detalladamente, el funcionamiento de un repetidor interconectado por fibra óptica, la siguiente figura muestra el diagrama de bloques que describe su funcionamiento.

Figura 7. Repetidor interconectado por fibra óptica



El repetidor consiste en dos cadenas de amplificación. Las señales que provienen y van hacia el móvil son combinadas por un duplexor que separa las frecuencias del enlace directo y enlace reverso. Las señales ópticas que provienen de la estación base son convertidas en el convertidor óptico.

En el enlace descendente, las señales ópticas son convertidas a señales de RF. Pasan a través de un divisor de cuatro vías, que distribuye las señales de RF a los módulos de RF.

Después de pasar a través del módulo, las señales son combinadas y luego amplificadas por el amplificador de enlace directo, para alimentar la antena de servicio, por el duplexor.

En el enlace ascendente, las señales de los móviles son separadas por el duplexor, pasando luego por una etapa de preamplificación y a un módulo de RF. Las señales son combinadas y convertidas nuevamente a señales ópticas por el convertidor óptico. Finalmente son transmitidas hacia la estación base.

El amplificador final, del enlace directo, incluye un detector de nivel de potencia para controlar la ganancia. En el enlace reverso, la ganancia es controlada por el combinador activo, para proteger la unidad de conversión óptica. A este procedimiento se le llama “control de nivel automático” (ALC).

Los módulos de RF se encargan de amplificar las señales recibidas y convertirlas a una frecuencia intermedia. Las señales, entonces, son filtradas por filtros altamente selectivos, y pasan a través de un atenuador controlado digitalmente. La atenuación puede ser configurada en pasos (en dB) establecidos por el fabricante, localmente o remotamente. Luego, las señales en la frecuencia intermedia, son convertidas nuevamente a la frecuencia original.

El duplexor, aísla los dos sentidos de transmisión: el enlace directo y el enlace reverso. La banda de paso del duplexor es el ancho de banda total en el enlace directo y reverso. En el caso del enlace reverso, se tienen frecuencias de 1850 - 1885 MHz o 1875 - 1910 MHz, y para el enlace directo, las frecuencias son de 1930 - 1965 MHz o 1955 - 1990 MHz.

El divisor de cuatro vías (*4-way-splitter*) provee las señales de RF a los módulos de RF. Este divide la señal del receptor, y provee salidas de RF iguales con una atenuación de 10 dB para los módulos de RF.

Para efectos de control a distancia, el repetidor incluye una señal modulada en *FSK*, con una portadora de 10.7 MHz, transmitida también por la fibra óptica.

2. CONFIGURACIÓN DE REPETIDORES EN UN SISTEMA *CDMA PCS*

2.1 Parámetros de instalación de un repetidor

Así como en cualquier otro sistema de comunicaciones móviles, en un sistema *CDMA PCS* existen áreas en donde la señal de cobertura de la estación base no es la adecuada para establecer una buena comunicación con el usuario. Estas áreas pueden ser: sótanos, bodegas, túneles, edificios, zonas de alto congestionamiento y otras. Es en estas áreas en donde los repetidores son comúnmente utilizados, para proporcionar una buena comunicación entre el usuario y la estación base de servicio.

Como es de esperarse, existen algunos requerimientos y consideraciones por tomar en cuenta en la instalación de un repetidor. Se deben cumplir ciertas condiciones de RF necesarias para su buen desempeño, y tomar en cuenta algunos parámetros especiales dependiendo de su aplicación.

2.1.1 Condiciones de RF

Como ya se mencionó anteriormente, un repetidor requiere de ciertas condiciones de RF para su buen desempeño. En general, son cuatro las condiciones necesarias, como se describe en la siguiente tabla.

Tabla I. Condiciones de RF

| |
|--|
| 1. Línea de vista o <i>LOS</i> , por sus siglas en inglés, <i>Line Of Sight</i> . Se requiere que exista línea de vista directa entre la antena de servicio de la estación base y la antena donante del repetidor. |
| 2. Aislamiento entre antenas del repetidor y selección de antenas. |
| 3. Buen control sobre el incremento del nivel de ruido en la estación base, debido al repetidor. |
| 4. Posicionamiento de antenas y separación entre la estación base donante y el repetidor. |

Estas condiciones deben considerarse para el buen desempeño de un repetidor, sin importar la aplicación del mismo. Sin embargo, algunas aplicaciones de los repetidores requieren un cumplimiento más riguroso de éstas.

Por ejemplo, para repetidores utilizados en extensión del rango de cobertura, se requieren ganancias en el orden de los 90 dB. Esto quiere decir que una línea de vista directa, es estrictamente requerida entre el repetidor y la estación base donante; y además de esto, se requieren antenas de alta ganancia, ya que la señal de entrada en el amplificador del repetidor es necesariamente débil.

Un amplificador con una ganancia cerca de los 90 dB tiene una baja tolerancia a las señales débiles, debido a que éstas son inestables en su entrada. La condición de "línea de vista directa" maximiza la estabilidad de dichas señales.

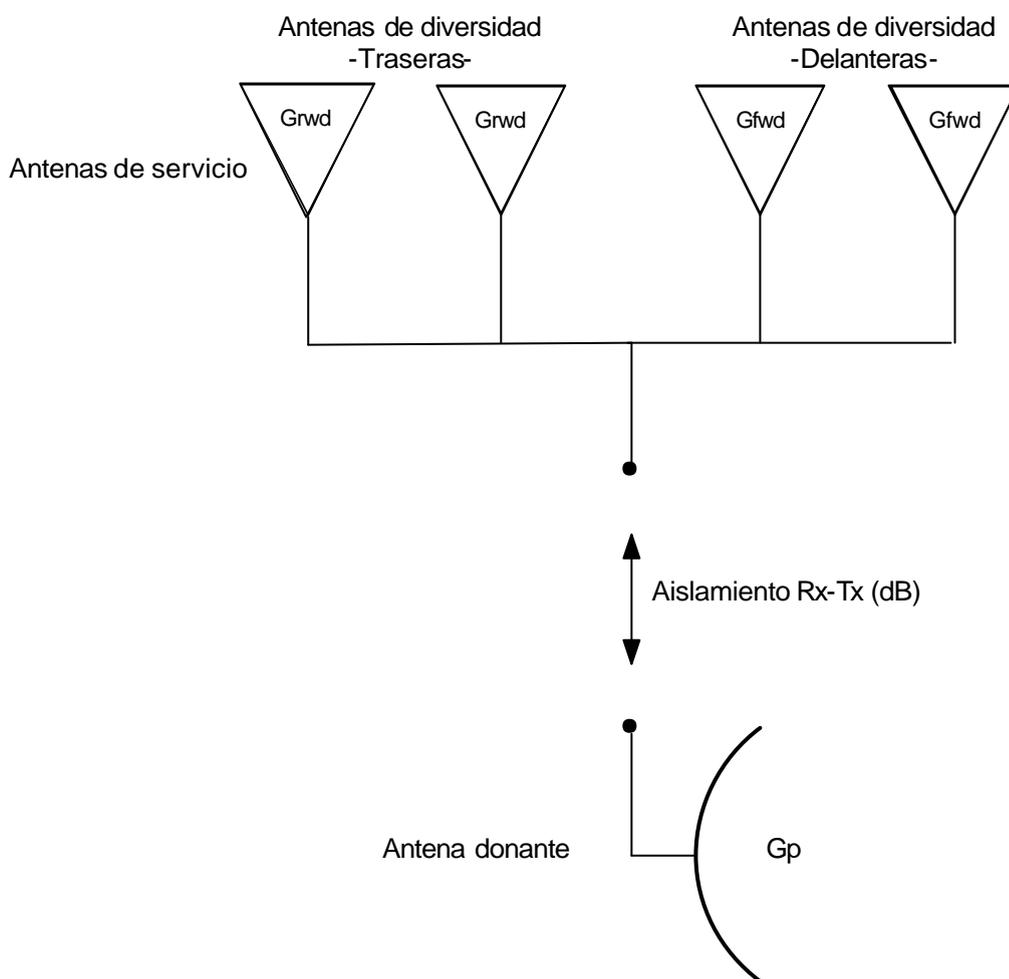
El enlace de radio frecuencia entre la estación base donante y el repetidor, requiere un margen de desvanecimiento (*fading*) adicional, que generalmente no existe en las redes comunes de estaciones base o micro celdas. La cobertura de un repetidor es sensible al nivel de dicho margen.

El nivel de desvanecimiento requerido, decrece rápidamente con la degradación de la línea de vista. En práctica, el margen de desvanecimiento debe ser medido para asegurar un adecuado servicio y disponibilidad. Para propósitos de planificación, se puede asumir un margen de desvanecimiento de 5 dB.

Como se verá más adelante, para extender el rango de cobertura, el repetidor debe estar posicionado cerca del límite de cobertura de la estación base donante. Con un enlace de RF con línea de vista, las pérdidas en la trayectoria son del orden de $1/r^2$, como resultado la menor pérdida posible. Esta menor pérdida, en dB, minimiza el nivel requerido de aislamiento entre las antenas del repetidor.

La siguiente figura define el aislamiento en dB, entre las antenas donante y de servicio del repetidor. En este caso, se tiene una antena parabólica donante y cuatro antenas de servicio.

Figura 8. Aislamiento entre antenas del repetidor



La ganancia del amplificador está limitada por el aislamiento Rx-Tx (recepción – transmisión) entre las antenas (donante y de servicio), para evitar la posible retroalimentación positiva y la oscilación del sistema.

En general, por experimentación, se utilizan niveles de ganancia en el repetidor entre 10 y 15 dB por debajo del nivel de aislamiento medido.

Por consiguiente, para poder tener una ganancia de 90 dB en un amplificador, es necesario un aislamiento entre antenas de 100 dB como mínimo. Más adelante se estudiarán algunos factores que determinan el aislamiento, tales como el tipo de antenas, su separación y su posicionamiento.

Las antenas preferiblemente deben estar bien separadas verticalmente, para obtener un aislamiento de 100 dB, por lo que se debe buscar un sitio en el cual se logre una buena separación vertical entre éstas. Más adelante se verá una ecuación que relaciona la separación vertical entre antenas y el nivel de aislamiento.

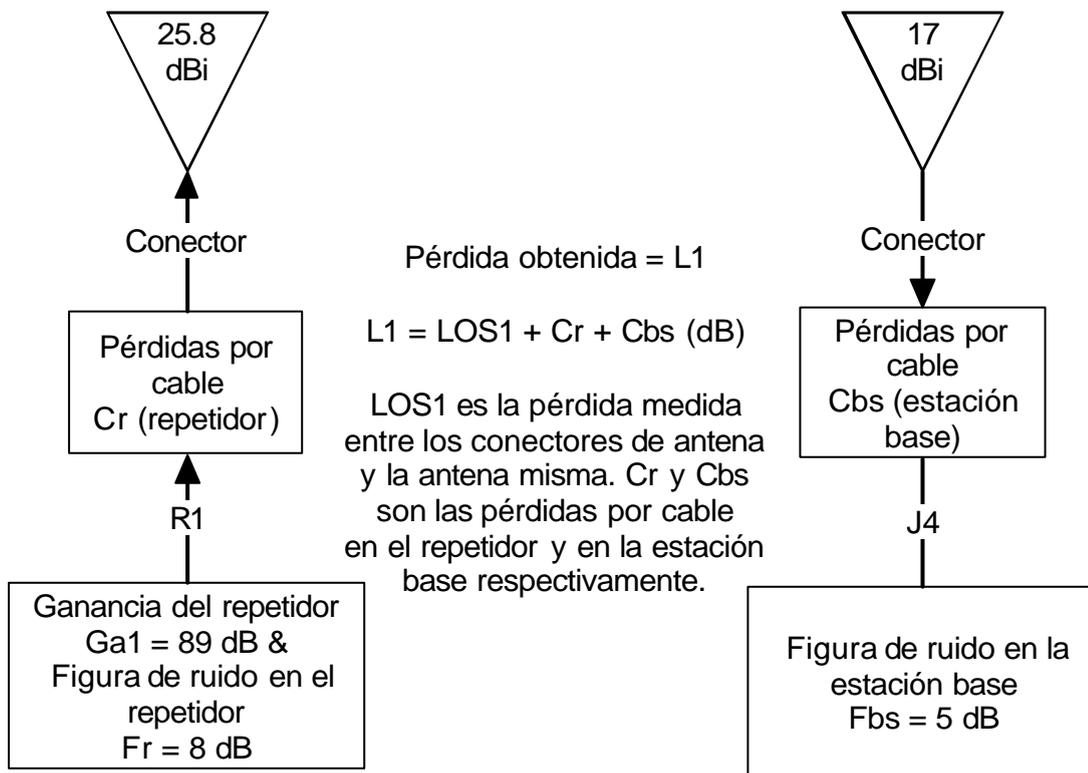
La ganancia del amplificador también está limitada por la necesidad de un control estricto en la reducción de cobertura de la estación base y el repetidor. Cuando un repetidor se “conecta” a una estación base, parte del ruido generado por el repetidor es introducido en la estación base, esto hace que la cobertura de la estación base donante se reduzca, es así limitada por el repetidor.

Cuando se va a medir el nivel de ruido en la estación base, la ganancia del amplificador debe estar justo por debajo de las pérdidas por línea de vista (aislamiento medido). El incremento del nivel de ruido en la estación base y el repetidor es extremadamente sensible a las ganancias altas del amplificador. Solo se necesitan unos pocos dB más de ganancia en el amplificador para generar un excesivo incremento del nivel de ruido.

La máxima ganancia del repetidor debe ser entonces, el valor mínimo que no reduzca excesivamente la cobertura original de la estación base, por la adición del ruido; o bien, el valor mínimo que proporcionan las pérdidas por línea de vista.

La siguiente figura ilustra las pérdidas por línea de vista y el ajuste de ganancia del repetidor.

Figura 9. Pérdidas por línea de vista



La distancia entre la estación base y el repetidor determina la cantidad de extensión de rango de cobertura obtenida.

Cuando los sitios están muy cercanos, el repetidor se encuentra posicionado muy cerca de la estación base donante, como para proveer suficiente extensión del rango, más allá de la señal original de la estación base. Esto también reduce la pérdida obtenida.

Del mismo modo, también se reduce la ganancia máxima del repetidor, a un nivel por debajo de los 90 dB, requeridos para extender el rango de cobertura. Cuando la ganancia del repetidor está por debajo de los 90 dB, se considera que el repetidor juega un papel de relleno de agujeros de RF, aunque en realidad, depende mucho del caso en consideración. Por consiguiente, el desempeño de un repetidor para lograr una extensión del rango de cobertura depende mucho del sitio por adquirir.

2.1.2 Antenas

Como ya se mencionó, la elección de las antenas donante y de servicio del repetidor, su posicionamiento y separación, son factores determinantes para el nivel de aislamiento. Algunas veces, la elección de las antenas dependerá de la aplicación que se le quiera dar al repetidor. A continuación se verán las características básicas de las antenas donante y de servicio en un repetidor.

Un término bastante utilizado en las antenas es, "eficacia direccional". Éste describe la eficacia en dB de las antenas direccionales, es decir, la potencia radiada hacia adelante sobre la potencia radiada desde la antena en el sentido inverso. Una eficacia direccional de 15 a 25 dB es bastante frecuente en las antenas direccionales.

La antena donante puede ser de tipo yagui, o de tipo parabólica. Las antenas yagui por lo general, tienen ganancias entre 12 a 22 dB; y las parabólicas, ganancias entre 25 a 40 dB. Como es de esperarse, la elección del tipo de antena donante depende de la ganancia que se requiera. Para ganancias altas generalmente se usan antenas parabólicas, debido a que la distancia y las pérdidas del repetidor hacia la estación base son mayores.

Las antenas de servicio son similares a las utilizadas en las estaciones base. Tienen la misma ganancia (17 dB), el mismo tipo de polarización, directividad, etc. Dependiendo de la aplicación, se usarán una o más antenas de servicio. La utilización de más de una antena tiene como ventajas la diversidad de espacio y la extensión del rango de cobertura.

Cuando el repetidor es utilizado para rellenar agujeros de RF en tramos largos, tales como túneles, pasillos o edificios, es posible utilizar “cable radiante” como antena de servicio, de modo que se pueda extender a lo largo del área que se quiere rellenar. En este caso, habrá que tomar en cuenta también algunas consideraciones técnicas debido al uso del cable radiante, tales como las pérdidas de acoplamiento y otras más.

2.1.3 Métodos de aislamiento

Existen diferentes formas de adquirir el nivel de aislamiento deseado y muchas variables que determinan dicho nivel; tales como: la elección del sitio, los niveles de ganancia requeridos, la distancia y pérdidas entre el repetidor y la estación base y otras.

Ya se ha mencionado anteriormente que el aislamiento entre antenas donante y de servicio del repetidor debe ser al menos de 10 dB mayor a la ganancia del amplificador. Este valor constituye la cantidad mínima de aislamiento, que se requiere para garantizar la estabilidad del sistema.

Como se mencionó en la sección anterior, la posición de las antenas también determina el nivel de aislamiento. De aquí se pueden derivar dos métodos de aislamiento: vertical y horizontal.

El aislamiento horizontal es posible, cuando se aprovechan las ventajas de las características topográficas o estructurales del sitio de repetición: edificios, colinas, etc.

Por otro lado, cuando las antenas están separadas verticalmente, posicionadas en forma colineal (una directamente sobre la otra), el aislamiento aumenta considerablemente. Las antenas con polarización vertical, prácticamente poseen áreas de señal nula en los extremos. La profundidad de estas áreas varía en relación directa con la ganancia de la antena.

Se puede aproximar el valor de aislamiento vertical, basándose en la siguiente ecuación:

$$\text{Aislamiento}(dB) = 28 + 40 \log \frac{sv}{\lambda}$$

Donde:

sv = separación vertical entre los centros emisores de las antenas.

λ = longitud de onda, en las mismas unidades que sv.

En la figura 8 se describió el aislamiento vertical entre cuatro antenas de servicio y una antena donante parabólica. El posicionamiento horizontal generalmente no puede ser usado para repetidores de extensión de rango, debido a las grandes distancias de separación requeridas.

Como se había mencionado antes, un aislamiento mínimo de 100 dB se requiere para repetidores utilizados en extensión de rango, de manera que ahora puede estimarse una separación vertical entre las antenas del repetidor. La separación estará dada en las mismas unidades que la longitud de onda.

Sustituyendo el valor de 100 dB en la ecuación y una longitud de onda para la señal de 1900 MHz, en metros $\lambda=0.1578$; despejando s_v se tiene:

$$s_v = 0.1578 * 10^{\frac{100-28}{40}} = 9.9565 \text{ metros}$$

Entonces, para repetidores utilizados en extensión de rango, una separación vertical de 10 metros (32 pies) como mínimo, es necesaria para obtener un aislamiento de 100 dB. Puede concluirse que esta es la única forma de adquirir un nivel de aislamiento aceptable; generalmente, esto implica un sitio con estructuras o torres altas.

Esta separación física provee también una componente de pérdida de espacio libre (pérdida de trayectoria) dada por la siguiente ecuación:

$$\text{Pérdida de espacio libre} = \left(\frac{4P(H-h)}{I} \right)^2$$

Donde:

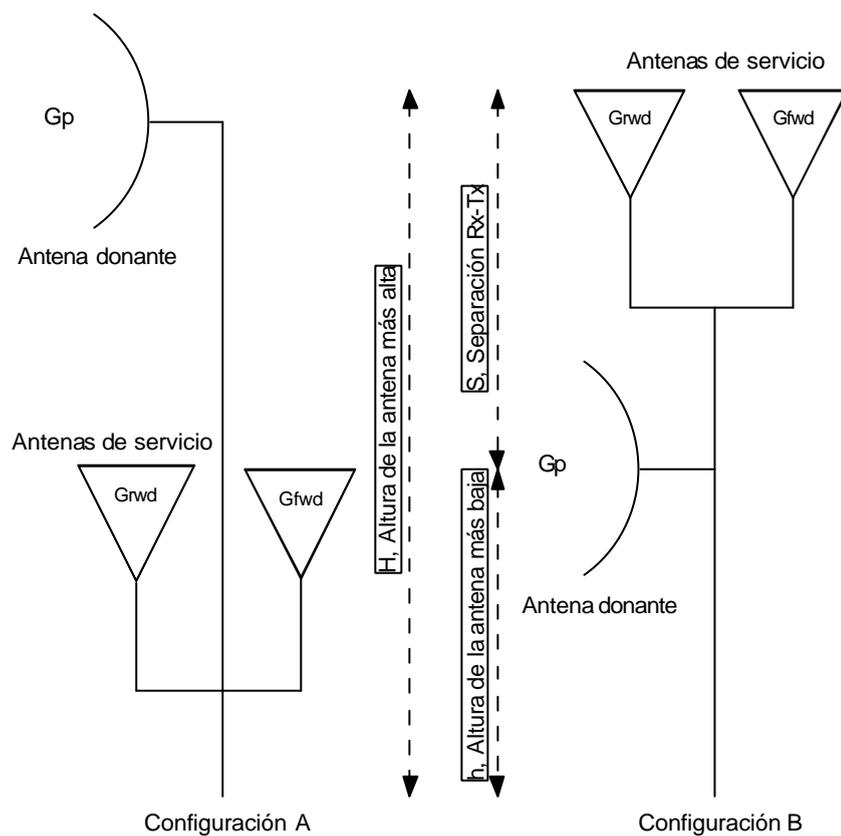
λ = la longitud de onda.

H = altura de la antena más alta.

h = altura de la antena más baja.

Estos parámetros se definen en la siguiente figura, describiendo las dos configuraciones básicas de aislamiento vertical.

Figura 10. Aislamiento y separación vertical $S = H - h$



En el caso de la configuración A, la antena donante está en el extremo superior, a una altura H, y las antenas de servicio se encuentran a una distancia S, abajo de la antena donante, a una altura h.

La configuración B, por otro lado, tiene las antenas de servicio en el extremo superior y la antena donante a una distancia $S = H - h$, abajo de las antenas de servicio.

En algunas aplicaciones, el aislamiento no es difícil de obtener, debido a que la zona de interés es una zona aislada de RF. Como por ejemplo, en cobertura de interiores: sótanos, túneles, edificios, centros comerciales y otros. Las pérdidas por obstrucción que se deben compensar para proveer cobertura a la zona de interés, suelen ser más que suficientes para cumplir con los requerimientos mínimos de aislamiento.

Algunas veces puede ser necesario buscar otros medios de obstrucción, tales como atenuadores de RF, ubicándolos de forma tal que "aislen" el paso de las señales de RF entre la antena donante y antenas de servicio del repetidor.

2.1.4 Otros

Se ha visto ya, que la instalación de un repetidor requiere que se cumplan ciertas condiciones, considerando la elección de antenas y el método de aislamiento por utilizar. También existen otras pérdidas y parámetros que se tomarán en cuenta en la instalación de un repetidor.

2.1.4.1 Potencia de salida e intermodulación

La potencia de salida de un repetidor, se expresa de manera formal en términos de su punto de compresión de 1 dB. El punto de compresión de 1 dB es la potencia de salida a la cual la ganancia se ha reducido 1 dB respecto del nivel que habría alcanzado en un sistema totalmente lineal. La intermodulación (*IM*) se incrementa con mayores niveles de sobreexcitación. El grado previsto de intermodulación puede calcularse mediante los niveles de potencia de señal de salida y el punto de compresión de 1 dB del repetidor.

En general, los repetidores son operados de tal forma que la salida de potencia compuesta se mantiene por debajo del punto de compresión de 1 dB a fin de minimizar los productos de intermodulación. Es importante tener en cuenta que el nivel de potencia compuesta de entrada del amplificador no debe ser capaz de sobreexcitarlo.

Por ejemplo, suponiendo que la estación base donante está transmitiendo a un 30% de su capacidad, entonces el repetidor debe respetar el mismo margen de transmisión respecto de su potencia máxima, evitando así la sobreexcitación del repetidor y sobrecargas en el sistema.

En áreas urbanas de alta densidad de señales, a menudo es necesario filtrar la entrada de los amplificadores de banda ancha. El filtrado resulta esencial para evitar que señales simultáneas exciten el amplificador hasta su punto de compresión de 1 dB. Un amplificador sobreexcitado generará una intermodulación significativa, y en el peor de los casos, se saturará por completo. El resultado será su pérdida de sensibilidad a las señales previstas.

2.1.4.2 Ruido

El ruido presente en un sistema de comunicaciones es una anomalía que afecta la propagación de radiofrecuencias. Básicamente, existen dos tipos de ruido: uno tiene su origen en el ambiente y el otro es generado dentro del equipo en consideración. Podría argumentarse, que eventualmente, estas dos clases de ruido se convierten en sí, en uno solo. A continuación se analizan los métodos para calcular y controlar el ruido generado dentro de los repetidores.

La sensibilidad máxima de un amplificador depende del ruido inherente en su etapa de entrada. El “factor de ruido” brinda una evaluación precisa del rendimiento de un amplificador en relación con el ruido. El factor de ruido es el resultado numérico de dividir la razón de señal a ruido (*SNR*) a la entrada por la razón de señal a ruido a la salida de un amplificador a cierta temperatura y sobre determinado ancho de banda. Expresado en dBm, el factor de ruido se convierte en la “cifra de ruido” y por lo tanto, la potencia de ruido de salida generada en un equipo amplificador está dada por:

$$P_N = -174 + BW \log 10 + G + Nf$$

Donde:

P_N = potencia de ruido en dBm a 290 Kelvin (temperatura ambiente).

BW = ancho de banda en Hz.

G = ganancia en dB.

Nf = cifra de ruido en dBm.

Como por ejemplo, supóngase que la ganancia de un amplificador en el enlace descendente es de 40 dB, teniendo una cifra de ruido de 10 dB, sobre un ancho de banda de 25 KHz; la potencia de ruido total generada sería de -80 dBm. El amplificador excitado a su potencia de salida máxima de 30 dBm, con una ganancia total de 40 dB, tendría una razón de señal a ruido a la salida de $[30 - (-80)] = 110$ dB.

En este caso, la razón señal a ruido es relativamente grande y no produce ningún tipo de problema en los sistemas de amplificador único. Por otro lado, cuando los amplificadores y elementos pasivos comienzan a agregarse en cascada, tal como sucede en los grandes sistemas de distribución, sobreviene la acumulación de ruido. A medida que en un sistema aumentan las distancias y se suman los amplificadores, las cifras de ruido se vuelven cada vez más críticas.

La potencia de ruido de salida total de un amplificador *CDMA* típico, con 95 dB de ganancia, una cifra de ruido de 8 dB, y sobre un ancho de banda de 1.25 MHz es de -10 dBm. Al principio, ésta puede parecer una potencia de ruido peligrosa, especialmente si se compara con una sensibilidad del receptor de -116 dBm. Puede pensarse que una potencia de ruido de semejante amplitud no tardaría en saturar la sección de entrada de cualquier receptor sensible. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que esa potencia de ruido está distribuida sobre una banda de 1.25 MHz y por lo tanto, cualquier pérdida de ruido específica, una entre miles de millones, resultará demasiado pequeña.

2.1.4.3 Repetidores en cascada

Cuando varios repetidores están conectados en cascada, forman una cadena de amplificadores. Toda la cadena puede ser evaluada como un único amplificador con una cifra de ruido en cascada. La fórmula general para el factor de ruido de todo el sistema es:

$$F_s = F_1 + \left(\frac{F_2 - 1}{G_1} \right) + \left(\frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} \right) + \dots + \left(\frac{F_n - 1}{G_1 G_2 G_3 \dots G_{n-1}} \right)$$

Donde:

F_n = factor de ruido del repetidor n.

G_n = ganancia del repetidor n.

Cuando una serie de amplificadores en cascada se encuentran interconectados, cada uno con la misma ganancia G , y una carga igual a esa ganancia, se dice que el sistema es un sistema de cero dB. Este puede ser una serie de amplificadores de línea, cada uno con una longitud de cable u otra carga igual a la ganancia de cada amplificador. En este caso la fórmula del factor de ruido del sistema se convierte en:

$$F_s = F_1 + (F_2 - 1) + (F_3 - 1) + \dots + (F_n - 1)$$

Simplificando aun más la fórmula anterior, convirtiéndola a cifra de ruido:

$$Nf = \log[n(F - 1) + 1]$$

Donde:

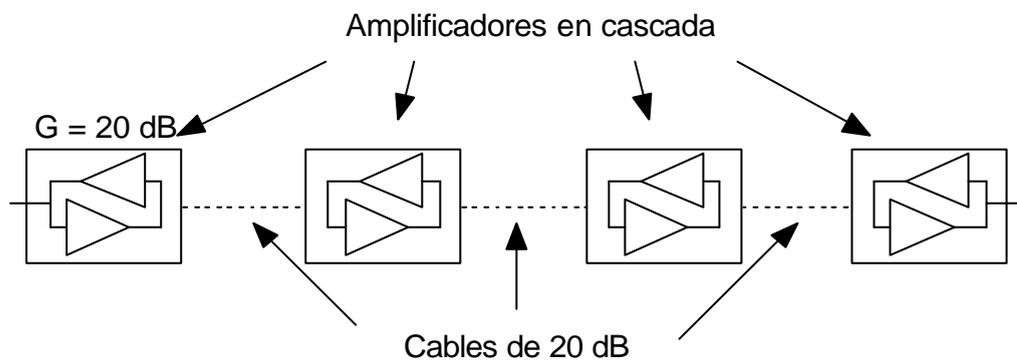
Nf = cifra de ruido.

n = número de amplificadores.

F = factor de ruido.

Véase como ejemplo la siguiente figura. Se tienen cuatro amplificadores de línea conectados en cascada y cuatro secciones de cable que operan en un sistema de cero dB.

Figura 11. Sistema de cero dB



La ganancia de cada amplificador es de 20 dB, la cifra de ruido de cada uno es de 12 dB y el ancho de banda de canal es de 25 KHz. El factor de ruido de cada amplificador es igual al antilogaritmo de la cifra de ruido entre 10, es decir:

$$F = \log^{-1} \left[\frac{12}{10} \right] = 15.8$$

Utilizando la ecuación de cifra de ruido del sistema, la cifra de ruido en cascada de la cadena de amplificadores es:

$$Nf = \log[4(15.8 - 1) + 1] = 17.8 \text{ dB}$$

A partir de la ecuación de potencia de ruido, es posible calcular la potencia de ruido de la cadena, aplicando la cifra de ruido de la cadena al último amplificador en la cadena como si operara solo, así:

$$P_N = -174 + \log 25000 + 20 + 17.8 = -92 \text{ dBm}$$

2.1.4.4 Sensibilidad

La sensibilidad se define como “la señal más pequeña que una red puede procesar en forma segura”. Esto especifica la intensidad de la señal más pequeña en la entrada de una red que hace que la potencia de la señal de salida sea M veces la potencia de ruido de salida, donde es necesario especificar M . Generalmente, se utiliza $M = 1$. Para una temperatura de la fuente de 290 K, la relación entre sensibilidad y cifra de ruido es como sigue:

$$Sens(dBm) = -174 + Nf + \log BW + \log M$$

Por ejemplo, si se tiene un amplificador con ganancia de 40 dB, una cifra de ruido de 10 dB, sobre un ancho de banda de 25 KHz, se tiene una sensibilidad operacional mínima de -120 dBm. Este resultado es interesante, si se toma en cuenta que ésta es mucho menor a la sensibilidad de una estación móvil típica, la cual es de -116 dBm.

Para el caso de los cuatro amplificadores conectados en cascada, de 20 dB de ganancia, se halla que la sensibilidad básica de la cadena es de -112 dBm.

En este caso, se pueden apreciar los efectos de la acumulación de ruido: la potencia de ruido del sistema es mayor que la sensibilidad básica del receptor (-116 dBm). Por lo tanto, en cualquier sistema resulta esencial mantener un margen suficiente de potencia de señal sobre la potencia de ruido (razón señal a ruido), cualquiera que sea la sensibilidad mínima del receptor. Esto no hace más que resaltar la importancia de diseñar amplificadores con la cifra de ruido más baja posible.

2.1.4.5 Tiempo de retardo

Cuando se considera el rango de cobertura de una celda sin tener repetidores enlazados a la misma, el equipo de la estación base está configurado para aceptar la conexión de estaciones móviles dentro de los límites de ese rango o área de cobertura.

Si se enlaza uno o varios repetidores a la estación base, utilizándolos para extensión del rango de cobertura de la celda, debe cambiarse también la configuración de la estación base donante, de tal manera que esta sepa que algunos móviles más allá de los límites de su rango de cobertura original pueden conectarse a través del repetidor.

Este requerimiento se basa también en el incremento diferencial del retardo entre trayectorias de la señal portadora. El incremento diferencial resulta de una señal recibida en el móvil, proveniente directamente de la estación base donante; y otra señal proveniente de la misma estación, pero a través del repetidor.

La distancia diferencial que las señales viajan sobre estas dos trayectorias es igual a la diferencia de las distancias de las dos trayectorias, y es directamente proporcional al retardo diferencial de propagación. Por ejemplo, si la distancia entre la estación base donante y el repetidor es de 10 kilómetros, y la estación móvil se encuentra en medio de estos, la distancia diferencial es de $15 - 5 = 10$ kilómetros.

Note que a medida que la distancia entre la estación base y el repetidor se incrementa, también se incrementa el retardo diferencial. Este parámetro por lo general no es un factor primordial, que limite la distancia de separación máxima entre la estación base donante y el repetidor, sin embargo se debe considerar, mayormente cuando se utilizan repetidores conectados en cascada.

2.2 Balances de potencia

Para estimar el rango de cobertura del repetidor, es necesario considerar la distancia de separación del repetidor a la estación móvil, la frecuencia y otros factores. La propagación básica está descrita en la ecuación de pérdida de espacio libre:

$$Pérdida(dB) = 32.2 + 20 \log D + 20 \log F$$

Donde:

D = distancia en millas.

F = frecuencia en MHz

Esta ecuación puede utilizarse para predecir el rango de cobertura en condiciones de espacio libre, es decir, en línea de vista directa; sin trayectorias múltiples.

Por ejemplo, si se quisiera saber el nivel de señal que podría recibir una estación móvil, a 8 kilómetros de la estación base, sabiendo que esta tiene una potencia efectiva radiada (*ERP*, por sus siglas en inglés) de 10 vatios, a una frecuencia de 1900 MHz, el procedimiento sería el siguiente:

1. Utilizando la ecuación de pérdida espacio libre, se sustituyen los valores de D y F. Pero como debe ingresarse D en millas, se convierte el valor de 8 kilómetros a millas, siendo entonces $D = 5$ millas y $F = 1900$ MHz. Ingresando los valores en la ecuación se obtiene una pérdida de espacio libre de 112 dB.
2. Antes de determinar el nivel de recepción, debe expresarse la *ERP* de 10 vatios en dBm, $10 \log (1000 \text{ mW}/1 \text{ mW}) = 40$ dBm.
3. La señal transmitida de 40 dBm sufre una pérdida de 112 dB a lo largo de la trayectoria hasta el punto remoto. Para determinar el nivel de recepción, se prosigue a “balancear” las ganancias y pérdidas que ocurren a lo largo de la trayectoria. El término balancear se refiere a sumar y restar dichas ganancias o pérdidas, y ésta es la razón por la cual a este procedimiento se le denomina “balance de potencias”.

Suponiendo que para el ejemplo anterior se tiene una ganancia de antena de 15 dB y pérdidas de la línea de recepción y el acoplador múltiple de unos 5 dB. La señal en el receptor tendría un nivel de -64 dBm, considerando 2 dB de pérdidas en el móvil; como se puede ver en la siguiente ecuación:

40 dBm (ERP) – 5 dB (línea y acoplador) + 15 dB (ganancia de la antena) – 112 dB (pérdida de espacio libre) – 2 dB (pérdidas en el móvil) = -64 dBm

En la siguiente figura se pueden observar los parámetros que se tomarán en cuenta para determinar el nivel de recepción en el móvil; y en la tabla se muestra el balance de potencias para el enlace descendente.

Figura 12. Nivel de recepción (enlace descendente)

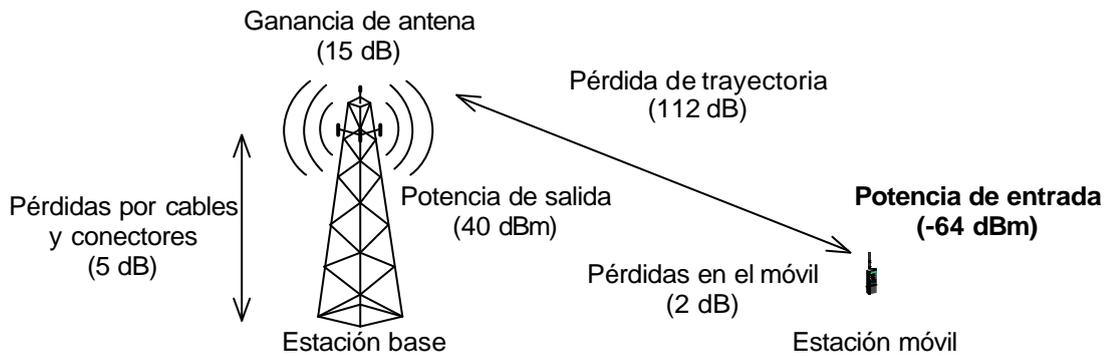


Tabla II. Balance de potencias para el nivel de recepción en la estación móvil

| Balance de potencia del enlace descendente | |
|---|---------|
| Potencia de salida (estación base) | 40 dBm |
| Pérdida por conectores y cables (estación base) | -5 dB |
| Ganancia de la antena (estación base) | 15 dB |
| Pérdida de trayectoria | -112 dB |
| Ganancia de la antena (estación móvil) | 0 dB |
| Pérdidas en la estación móvil | -2 dB |
| Nivel de recepción en la estación móvil | -64 dBm |

De igual forma, en el enlace ascendente, si se supone un nivel de transmisión de la estación móvil, de 200 mW (23 dBm), unos 2 dB de pérdidas en la estación móvil, la misma pérdida de espacio libre de 112 dB, una ganancia en la antena receptora de 15 dB, y pérdidas en la línea de recepción y el acoplador de 5 dB. La señal alcanzará el receptor de la estación base con -81 dBm.

La siguiente figura muestra los parámetros que se tomarán en cuenta para determinar el nivel de recepción en la estación base; y en la tabla se presenta el balance de potencias obtenido.

Figura 13. Nivel de recepción (enlace ascendente)

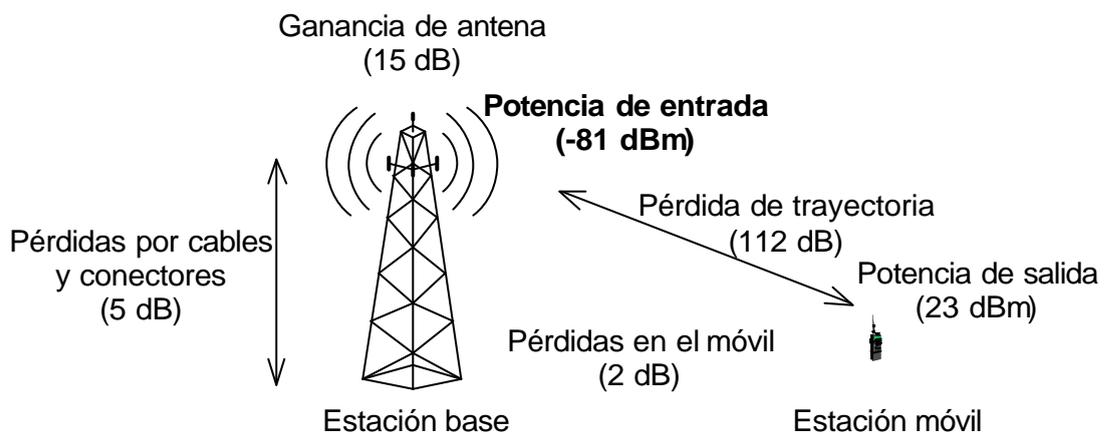


Tabla III. Balance de potencias para el nivel de recepción en la estación base

| Balance de potencia del enlace ascendente | |
|--|---------|
| Potencia de salida (estación móvil) | 23 dBm |
| Pérdidas en la estación móvil | -2 dB |
| Ganancia de la antena (estación móvil) | 0 dB |
| Pérdida de trayectoria | -112 dB |
| Ganancia de la antena (estación base) | 15 dB |
| Pérdida por conectores y cables (estación base) | -5 dB |
| Nivel de recepción en la estación base | -81 dBm |

Los resultados anteriores hacen concluir que el sistema está limitado en el sentido del enlace ascendente; es decir, existe un desequilibrio entre el enlace descendente y el ascendente de aproximadamente 17 dB. En este ejemplo, un repetidor que proporcionara una ganancia ajustable en las trayectorias ascendente y descendente podría utilizarse para lograr una paridad entre los niveles de transmisión de enlace ascendente y descendente.

En algunos casos, puede ser necesario otro amplificador que compense las pérdidas de espacio libre u otro tipo de pérdidas, para poder establecer el enlace en ambos sentidos.

Por definición, el término “espacio libre” supone la existencia de una trayectoria rectilínea entre el transmisor y el receptor. En muchos casos, debido a la altura de las torres o a la elevación del terreno, no existen condiciones de propagación en el espacio libre. Una ecuación que puede utilizarse para establecer una diferencia aproximada entre la propagación en el espacio libre y otros modelos de propagación es la siguiente:

$$d = (2.3 * 10^{-6}) F(H_t H_r)$$

Donde:

d = distancia en millas.

F = frecuencia en MHz.

Ht = altura de la antena de transmisión en pies.

Hr = altura de la antena de recepción, también en pies.

El modelo de propagación en el espacio libre se utiliza cuando la distancia de la trayectoria es menor que d. Si la distancia de la trayectoria es mayor que d, se utiliza otro modelo de propagación.

Actualmente se utilizan muchos modelos de propagación, la mayoría de los cuales están integrados en programas especializados a la predicción de cobertura por computadora.

El modelo Egli es un método manual sumamente directo para predecir la pérdida de propagación total en un terreno ondulado, con elevaciones aproximadamente de 15 metros (50 pies). La fórmula para el modelo Egli es la siguiente:

$$A_E = 117 + 40 \log D + 20 \log F - 20 \log(H_t H_r)$$

Donde:

A_E = atenuación de trayectoria.

D = distancia en millas.

F = frecuencia en MHz.

Ht = altura de la antena de transmisión en pies.

Hr = altura de la antena de recepción, también en pies.

También es posible derivar una fórmula de estimación de llenado que indique el área de cobertura de RF suministrada por una antena de dipolo. A partir de la ecuación de pérdida de espacio libre, si se factoriza la ganancia de la antena, la pérdida de línea, la ganancia del amplificador, las pérdidas internas, la señal en aire disponible, la sensibilidad del receptor y se resuelve para obtener la cobertura en pies, la fórmula es:

$$D(\text{metros}) = \log^{-1} \left[\frac{S + A + G - (-Sens) - X - L - 32.2 - 20 \log F}{20} \right] * 1609.34$$

Donde:

D = distancia radial máxima desde la antena de dipolo hacia el receptor.

S = intensidad de señal en la antena exterior.

A = ganancia de la antena exterior.

G = ganancia del amplificador.

Sens = sensibilidad del receptor.

X = pérdida de línea.

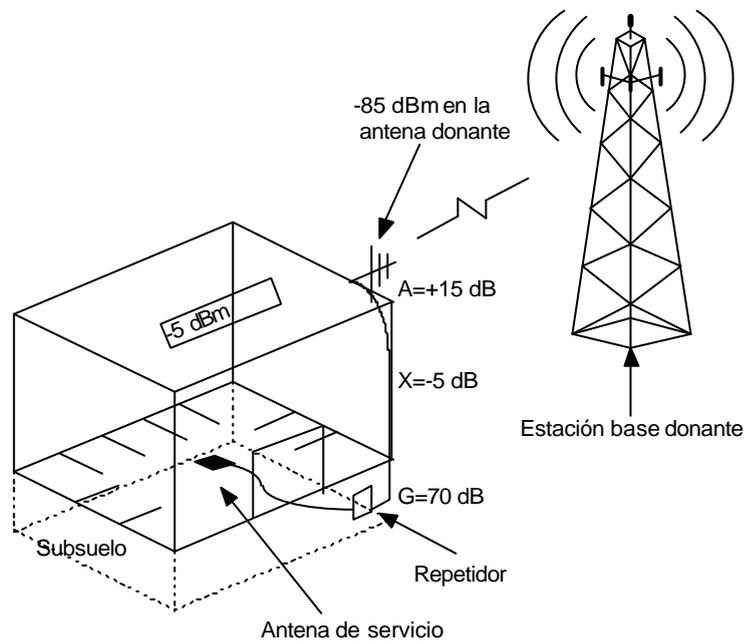
L = pérdidas en interior por absorción de paredes, muebles, etc.

F = frecuencia en MHz.

La cobertura en metros cuadrados se puede obtener multiplicando los resultados por πR^2 . Véase como ejemplo de aplicación de la ecuación anterior, cómo puede llenarse un área de señal nula existente, en la cobertura del sector de un sitio de una celda PCS.

La siguiente figura muestra las ganancias y pérdidas típicas del sistema y cómo se utilizan estos valores en la ecuación de pérdida de espacio libre adaptada, descrita anteriormente. Cuando se utiliza esta ecuación para estimar el rango del sistema de esta manera, se le denomina fórmula de “pérdida disponible”.

Figura 14. Uso de la fórmula de pérdida disponible



En este ejemplo, se cuenta con una antena de captación en aire y un amplificador bidireccional (repetidor), que alimenta una antena puntual ubicada en el estacionamiento. El objetivo es llenar el área de señal nula existente en el estacionamiento, la cual la estación base no puede cubrir.

El área de señal nula consiste en un estacionamiento debajo de un edificio (sótano). La señal en el extremo superior donde se encuentra la antena donante del repetidor es de -85 dBm.

Al colocar los valores apropiados en la fórmula de pérdida disponible se tiene:

$$D(m) = \log^{-1} \left[\frac{(-85 + 15 + 70 - (-95) - 5 - 12 - 32.2 - 20 \log 1900)}{20} \right] * 1609.34 = 165 \text{ m}$$

Donde:

D = distancia radial máxima desde la antena de dipolo hacia el receptor.

S = intensidad de señal en la antena exterior, -85 dBm.

A = ganancia de la antena de captación en aire, 15 dB.

G = ganancia del repetidor en enlace descendente, 70 dB.

Sens = sensibilidad del receptor, -95 dBm.

X = pérdida de línea, -5 dB.

L = pérdidas en interior por absorción de las paredes, -12 dB.

F = frecuencia, 1900 MHz.

De esta manera puede estimarse una cobertura radial de aproximadamente 165 metros, o 85530 metros², debidos a la antena de dipolo en el interior de la zona de interés de señal nula.

Las variables en la fórmula de estimación de llenado, deben calcularse lo más exactamente posible, deben ser medidas con anterioridad para poder predecir correctamente la cobertura. Hay que tomar en cuenta que la fórmula se aplica solamente a propagación rectilínea, sin tomar en cuenta las trayectorias múltiples que pueden mejorar o empeorar el rendimiento del repetidor bajo determinadas condiciones.

También es necesario calcular con precisión las cualidades de absorción de las paredes, mobiliario, etc. La fórmula utilizada anteriormente asigna un valor de 12 dB como cantidad estimada de pérdida por absorción de señal. Éste es solo un “valor estimativo”. Algunos textos asignan un valor de 20 dB y más. En el mejor de los casos, deben medirse las pérdidas por absorción en la zona de interés, a fin de obtener un valor más preciso para la fórmula.

A continuación se muestra el balance de potencias del enlace descendente del ejemplo anterior.

Tabla IV. Balance de potencias del enlace descendente – Uso de la fórmula de pérdida disponible

| Balance de potencia del enlace descendente | |
|---|---------|
| Intensidad de señal en el aire | -85 dBm |
| Ganancia de antena exterior | +15 dB |
| Pérdida total de línea | -5 dB |
| Ganancia del amplificador en enlace descendente | +70 dB |
| Potencia total radiada en el interior | -5 dBm |

Este balance de potencias utiliza algunos de los términos utilizados en la fórmula de pérdida disponible. Es posible obtener un balance de potencias similar del enlace ascendente, del repetidor a la estación base.

2.3 Configuración del repetidor

La configuración del repetidor consiste en medir algunos de los parámetros de instalación calculados y estimados anteriormente, con el fin de realizar los ajustes necesarios antes de encender el repetidor por primera vez y realizar las pruebas del sistema.

Antes de realizar las mediciones, debe verificarse que el equipo por utilizar esté debidamente calibrado.

2.3.1 Potencia de recepción en antena donante

Para medir la potencia de recepción en la antena donante, se utiliza un analizador de espectro o un medidor de potencia universal. Se mide la potencia de recepción, tomando como referencia la dirección en la que la antena donante se encuentre en línea de vista directa con la estación base donante. Para asegurar la máxima potencia de recepción, se puede hacer un barrido en la dirección del sector donante, hasta encontrar el valor de potencia deseado.

La altura a la que se encuentra la antena se toma con base en los cálculos previamente realizados y no debería de cambiarse en este punto.

2.3.2 Pérdidas en los cables y conectores

Considerando que los valores estimativos no son cien por ciento precisos, se procede a medir también las pérdidas producidas por los cables y conectores. Estas mediciones se realizan también con el analizador de espectro o el medidor de potencia universal y un generador de señal.

Antes de instalar el equipo de repetición, se conectan los cables y conectores por utilizar, generando una señal con las mismas características que la señal del sistema, y se procede a medir las pérdidas en dB producidas por los cables y conectores.

2.3.3 Aislamiento entre antenas

Para medir el aislamiento entre las antenas donante y de servicio, se utiliza un generador de señal conectado a la antena donante y un analizador de espectro o medidor de potencia universal conectado a la antena de servicio. El generador de señal simula una señal con las mismas características que la señal del sistema.

Tomando en cuenta las pérdidas de los cables en la medición, se obtiene el aislamiento realizando el del sistema.

Por ejemplo, si en el generador de señal se está transmitiendo 19 dBm, con 2 dB de pérdida en el cable, y se está midiendo -73 dBm más 2 dB de pérdidas por el cable; el aislamiento entre las antenas es de 92 dB.

Si se tienen dos antenas de servicio, el aislamiento se mide tomando como referencia la antena que de la mayor cantidad de potencia. Es decir, si por ejemplo, con los datos del ejemplo anterior, se mide -73 dBm en una antena y -70 dBm en la otra, el aislamiento entre las antenas es de 89 dB.

2.3.4 Pérdidas por estructuras

Cuando el repetidor es utilizado en interiores o rellenando agujeros de RF, es común encontrarse con estructuras que produzcan pérdidas en la señal. Estas pérdidas se pueden estimar pero preferiblemente se deben medir para asegurar el cálculo de los balances de potencia.

Las pérdidas de una estructura se miden, tomando como referencia la potencia de recepción antes de la estructura, o sin la estructura presente; y la potencia de recepción después de la estructura, o con la estructura presente. De este modo, la resta de tales valores da las pérdidas producidas por la estructura deseada.

2.3.5 Pruebas del repetidor

Antes de hacer las pruebas del sistema, se debe comprobar que el repetidor realmente amplifique la señal de entrada. Para hacer esto debe conectarse el generador de señal en la entrada del repetidor y el analizador de espectro o medidor de potencia universal en la salida del repetidor; con el repetidor en su mínima ganancia. Se deben tomar en cuenta los valores mínimos y máximos permitidos por el equipo de medición y el repetidor, para no causar daños al equipo. De preferencia se deben consultar los manuales de referencia proporcionados por los fabricantes.

2.4 Consideraciones de diseño

Hasta ahora se han visto algunos parámetros de instalación y configuración de repetidores. Las cuatro condiciones de RF son condiciones exclusivas de una red híbrida de repetidores. En otras palabras, no pueden faltar.

Si el fin es utilizar un repetidor como sustituto de una estación base, para así contribuir a una reducción de celdas, y por consiguiente, una reducción de costos; antes de dar por sentado que el sitio de repetición es el adecuado, deben medirse correctamente las pérdidas de espacio libre (*LOS*), el aislamiento entre antenas, con las antenas por utilizar instaladas correctamente y el margen de desvanecimiento del enlace de RF. Cuando las condiciones de RF requeridas no se cumplen, no hay otra solución más que instalar una nueva estación base o microcelda.

Debe notarse también que las cuatro condiciones de RF son mutuamente dependientes. Esto hace que el diseño de una red híbrida de repetidores sea un poco más complejo. Véase el papel interdependiente de las condiciones de RF en el siguiente ejemplo.

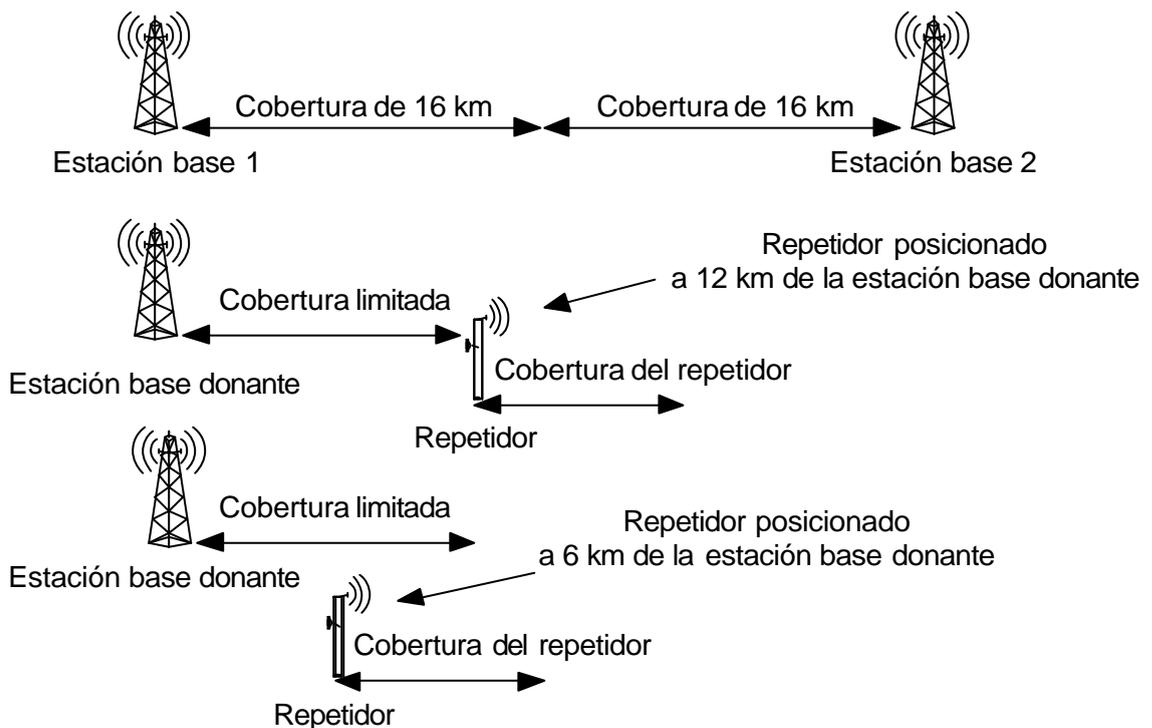
Si se utiliza un repetidor, posicionado muy lejos de la estación base donante, las pérdidas de espacio libre son relativamente grandes. Entonces, se debe incrementar la ganancia del repetidor, de modo que las pérdidas de espacio libre puedan compensarse. Sin embargo, el aislamiento entre las antenas limita la cantidad de ganancia por incrementar en el repetidor. Por consiguiente, esto limita cuán cerca o lejos de la frontera de cobertura de la estación base donante pueda ser posicionado el repetidor.

Si el aislamiento cae por debajo de los 100 dB, el repetidor debe estar posicionado bastante cerca de la estación base donante. Puede llegar un punto en el cual el repetidor está tan cerca de la estación base donante, que realmente no provea suficiente extensión de rango de cobertura, más allá de la cobertura misma de la estación base. En este caso, el repetidor no tendría mayor sentido, menos desde el punto de vista económico.

Cuando la estación base donante y el repetidor no se encuentran realmente en línea de vista directa, las pérdidas por espacio libre son más altas, del mismo modo, la distancia de separación entre el repetidor y la estación base. Esta pérdida extra, en dB, incrementa el nivel requerido de aislamiento. De manera que para poder obtener la misma cobertura, como si existiera línea de vista directa, el aislamiento entre antenas debe ser incrementado para compensar las pérdidas de espacio libre. Por consiguiente, la ganancia del amplificador será incrementada proporcionalmente.

Este ejemplo demuestra la complejidad del diseño de una red híbrida de repetidores. Sin embargo, algunas veces puede encontrarse con ciertas simplificaciones. Generalmente los repetidores deben ser posicionados cerca de la frontera de cobertura de la estación base donante, para que se pueda extender el rango y reducir así el número de estaciones base, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 15. Posicionamiento del repetidor



La figura muestra una configuración que permite una separación de aproximadamente 12 kilómetros entre la estación base donante y un repetidor. La estación base provee cobertura a un tramo de carretera de 16 kilómetros, de tal manera que el repetidor es posicionado cerca de ese límite de cobertura.

La separación entre la estación base donante y el repetidor recomendada es de 12 kilómetros.

Si el repetidor se posicionara cerca de 3 ó 4 kilómetros de la estación base donante, el área de cobertura obtenida no contribuiría a una reducción de estaciones base y por consiguiente, no tendría ningún sentido económico.

3. APLICACIONES DE REPETIDORES EN UN SISTEMA *CDMA PCS*

En el capítulo anterior se consideraron ya los parámetros de instalación y configuración de un repetidor o bien, de varios repetidores en un sistema *CDMA PCS*. Como bien se sabe, una red híbrida de repetidores está compuesta de estaciones base y repetidores utilizados en múltiples aplicaciones. En este capítulo se estudiarán las aplicaciones más comunes de un repetidor y aquellas aplicaciones que permiten la reducción de estaciones base en una red celular; por último, se hará un análisis real sobre el desempeño de un repetidor en un sistema *CDMA PCS*.

3.1 Aplicaciones típicas de un repetidor

Comúnmente los repetidores han sido utilizados simplemente para rellenar agujeros de RF o bien, proveer servicio a interiores de comerciales, edificios empresariales, sótanos, bodegas y otros. Estas aplicaciones por lo general, no contribuyen a una reducción de estaciones base en el sistema, y por consiguiente, no favorecen al crecimiento del mismo. Sin embargo, permiten la solución a aquellos problemas de cobertura dentro de la red celular que tendrían mayor costo si se solucionaran con otros equipos.

Uno de los problemas de cobertura más comunes en un sistema de telefonía celular es el de los agujeros de RF.

Un agujero de RF no es más que un área dentro de la cobertura de una estación base, en la cual, la señal de RF no cumple los requerimientos mínimos de calidad para el buen desempeño del sistema. Esto se debe a obstrucciones por objetos cerca del “agujero”, o bien, falta de línea de vista entre la estación base y el agujero de RF.

En zonas urbanas pueden encontrarse dos clases de agujeros de RF: aquellos que se producen en exteriores y los producidos en interiores.

Los agujeros de RF en exteriores son mayormente producidos por obstrucción de edificios o estructuras cercanas a la región aislada de RF. Por otro lado, los agujeros de RF en interiores se encuentran comúnmente en edificios, centros comerciales, industrias y otras estructuras, que debido a su localización o construcción, se encuentran prácticamente “blindadas” a la señal de RF proveniente de la estación base más cercana.

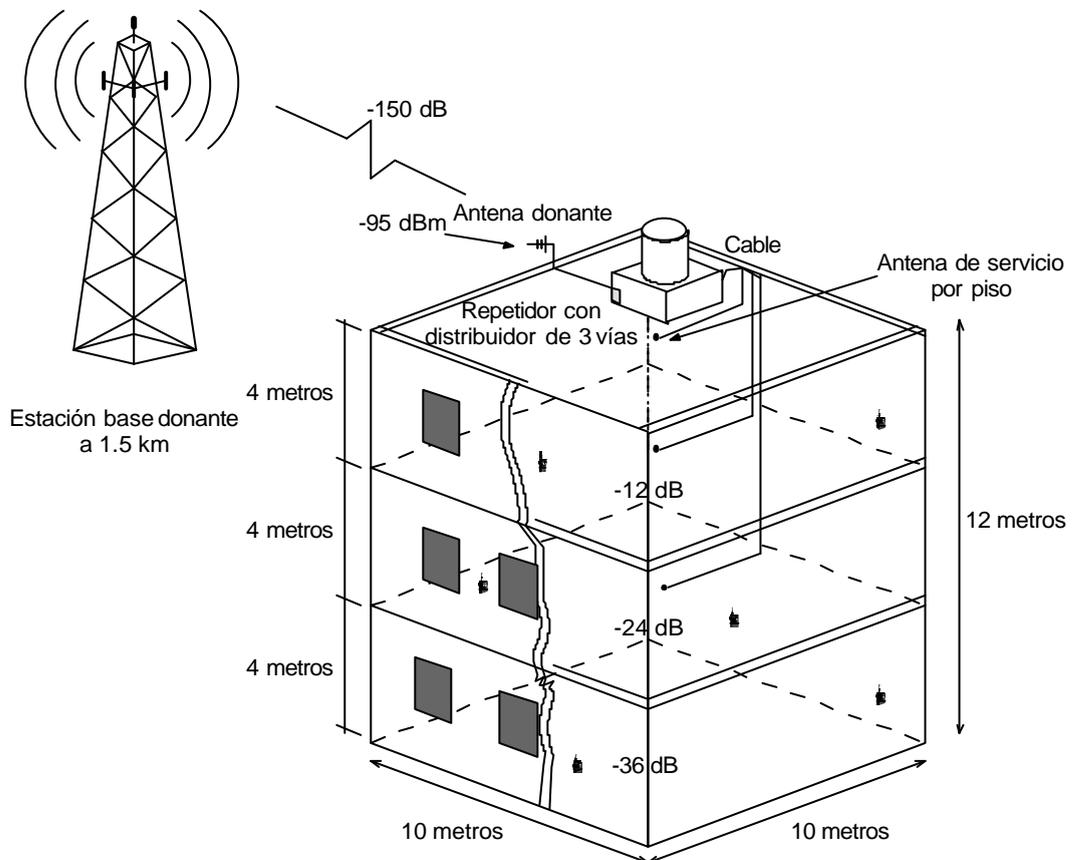
A continuación se examinará el uso de un repetidor para proveer cobertura a un edificio empresarial de tres pisos. El edificio está construido con hormigón y acero, y tiene ventanas metalizadas y tonalizadas; por lo cual está prácticamente blindado a las ondas de RF provenientes de la estación base más cercana, ubicada a 1.5 kilómetros del edificio.

Supóngase que la antena remota no está en línea directa respecto de la estación base. Esto complica más la situación, pero permite aprovechar al máximo el repetidor en una aplicación urbana. La fórmula del modelo Egli da aproximadamente 110 dB de atenuación de trayectoria, suponiendo una altura de antenas de 30 y 12 metros; en cambio, la ecuación de pérdida de espacio libre da solamente 98 dB. También se deben tomar en cuenta las pérdidas de obstrucción provocadas por edificios y estructuras cercanas al edificio en cuestión.

Se realizó la estimación para una trayectoria de 1.5 kilómetros con una atenuación de 110 dB, tomando en cuenta una pérdida por obstrucciones de aproximadamente 40 dB. Para asegurar el resultado de los balances de potencia se deben medir las pérdidas de trayectoria, las pérdidas por edificios o estructuras cercanas y las pérdidas en el interior del edificio.

La siguiente figura muestra el edificio, especificando sus dimensiones y las pérdidas producidas en cada nivel. También se muestra el nivel de señal de recepción en la antena donante y el diseño del sistema que se explicará más adelante.

Figura 16. Repetidor en edificio de tres pisos



Las pérdidas por obstrucción en el interior del edificio son causadas por paredes, puertas, mobiliario y otros.

Los balances de potencia que se muestra a continuación, corresponden al enlace ascendente y descendente, sin repetidor. La tabla muestra los niveles de señal para cada piso del edificio, tomando en cuenta las pérdidas en el interior de cada uno.

Tabla V. Balance de potencias del enlace ascendente sin repetidor para el edificio de tres pisos

| Balance de potencias del enlace ascendente | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|
| | 3er. Piso | 2do. Piso | 1er. Piso |
| Potencia de salida de la estación móvil | 23 dBm | 23 dBm | 23 dBm |
| Pérdidas en la estación móvil | -2 dB | -2 dB | -2 dB |
| Pérdidas en el interior del edificio | -12 dB | -24 dB | -36 dB |
| Pérdidas por obstrucción, edificios vecinos | -40 dB | -40 dB | -40 dB |
| Pérdida de trayectoria, 1.5 kilómetros | -110 dB | -110 dB | -110 dB |
| Ganancia de la antena en la estación base | 17 dB | 17 dB | 17 dB |
| Pérdida de línea en la estación base | -2 dB | -2 dB | -2 dB |
| Nivel de señal de enlace ascendente en el receptor de la estación base | -126 dBm | -138 dBm | -150 dBm |

Tabla VI. Balance de potencias del enlace descendente sin repetidor para el edificio de tres pisos

| Balance de potencias del enlace descendente | | | |
|--|------------------|------------------|------------------|
| | 3er. Piso | 2do. Piso | 1er. Piso |
| Potencia de salida de la estación base | 40 dBm | 40 dBm | 40 dBm |
| Pérdidas de línea en la estación base | -2 dB | -2 dB | -2 dB |
| Ganancia de la antena en la estación base | 17 dB | 17 dB | 17 dB |
| Pérdida de trayectoria, 1.5 kilómetros | -110 dB | -110 dB | -110 dB |
| Pérdidas por obstrucción, edificios vecinos | -40 dB | -40 dB | -40 dB |
| Pérdidas en el interior del edificio | -12 dB | -24 dB | -36 dB |
| Pérdidas en la estación móvil | -2 dB | -2 dB | -2 dB |
| Nivel de señal de enlace descendente en el receptor de la estación móvil | -109 dBm | -121 dBm | -133 dBm |

En las dos tablas anteriores se puede notar la necesidad de mejorar el nivel de la señal, primordialmente en los primeros dos pisos del edificio. También es notable que el sistema está limitado en el enlace ascendente, por lo tanto, se debe diseñar el sistema para reforzar dicho enlace.

Antes de realizar el diseño del sistema se procede a calcular el nivel de señal de enlace descendente en el exterior del edificio. Esto se puede hacer basándose en el balance de potencias previamente visto, sin tomar en cuenta las pérdidas en el interior del edificio y las pérdidas en la estación móvil. La señal de enlace descendente en el exterior del edificio es de -95 dB. Este dato sirve como referencia para la selección de la antena donante. En este caso, una antena donante con 12 dB de ganancia es suficiente para obtener unos -85 dB en la entrada del repetidor. Esta antena puede ser de tipo yagui.

En cambio, para el enlace ascendente, la estación móvil se encuentra transmitiendo a su máxima potencia y alcanza a la estación base con un nivel de -114 dB.

Este dato sirve como referencia para determinar la potencia a la cual se desea que el repetidor opere en el enlace ascendente, y por consiguiente, la ganancia del mismo para dicho enlace. Supóngase que se quiere alcanzar a la estación base con -100 dB, entonces el repetidor deberá transmitir a 25 dBm, y se debe buscar una ganancia que permita dicha potencia de salida en el enlace ascendente.

Para distribuir la señal en cada uno de los pisos del edificio se utilizaron antenas de servicio para interiores de 7 dB de ganancia, y un “distribuidor de señal” (*splitter/combiner*) de tres vías ubicado junto al repetidor en la parte superior del edificio (figura 16). Esto quiere decir que se tiene una pérdida adicional aproximadamente de -1 dB para cada uno de los pisos inferiores, debido al incremento de la longitud del cable que va desde cada antena hacia el distribuidor; y además, cerca de -5 dB de pérdida debidos al distribuidor de señal.

La función del distribuidor de señal consiste en dividir la potencia de salida de enlace descendente del repetidor en tres partes iguales. En este caso, el repetidor de 33 dBm (2 vatios) podrá transmitir como máximo a 29 dBm (0.67 vatios) en cada piso.

El balance de potencias para el enlace ascendente, ahora ya tomando en cuenta el repetidor, queda de la siguiente manera.

Tabla VII. Balance de potencias del enlace ascendente con repetidor para el edificio de tres pisos

| Balance de potencias del enlace ascendente | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|
| | 3er. Piso | 2do. Piso | 1er. Piso |
| Potencia de salida de la estación móvil | -46 dBm | -45 dBm | -44 dBm |
| Pérdidas en la estación móvil | -2 dB | -2 dB | -2 dB |
| Pérdidas en el interior del edificio | -12 dB | -12 dB | -12 dB |
| Ganancia de la antena de servicio del repetidor | 7 dB | 7 dB | 7 dB |
| Pérdida del cable, puente-conector | -2 dB | -3 dB | -4 dB |
| Pérdida del distribuidor | -5 dB | -5 dB | -5 dB |
| (Entrada en el repetidor) | (-60 dBm) | (-60 dBm) | (-60 dBm) |
| Ganancia del repetidor | 85 dB | 85 dB | 85 dB |
| (Salida del repetidor) | (25 dBm) | (25 dBm) | (25 dBm) |
| Pérdida del cable, puente-conector | -2 dB | -2 dB | -2 dB |
| Ganancia de la antena donante | 12 dB | 12 dB | 12 dB |
| Pérdidas por obstrucción, edificios vecinos | -40 dB | -40 dB | -40 dB |
| Pérdida de trayectoria, 1.5 kilómetros | -110 dB | -110 dB | -110 dB |
| Ganancia de la antena en la estación base | 17 dB | 17 dB | 17 dB |
| Pérdidas del cable, puente-conector en la estación base | -2 dB | -2 dB | -2 dB |
| Nivel de señal de enlace ascendente en el receptor de la estación base | -100 dBm | -100 dBm | -100 dBm |

Puede notarse que el nivel de señal para el enlace ascendente en la estación base es de -100 dBm, como era de esperarse con el repetidor transmitiendo a 25 dBm.

En este caso la estación móvil reduce el nivel de transmisión a medida que se aumenta la ganancia del repetidor. Una ganancia de 85 dB garantiza que la estación móvil no intente reducir su nivel de transmisión a menos de -50 dBm.

Ahora véase que sucede con el enlace descendente, tomando en cuenta el repetidor. La siguiente tabla muestra el balance de potencias para dicho enlace.

Tabla VIII. Balance de potencias del enlace descendente con repetidor para el edificio de tres pisos

| Balance de potencias del enlace descendente | | | |
|--|------------------|------------------|------------------|
| | 3er. Piso | 2do. Piso | 1er. Piso |
| Potencia de salida de la estación base | 40 dBm | 40 dBm | 40 dBm |
| Pérdidas del cable, puente-conector en la estación base | -2 dB | -2 dB | -2 dB |
| Ganancia de la antena en la estación base | 17 dB | 17 dB | 17 dB |
| Pérdida de trayectoria, 1.5 kilómetros | -110 dB | -110 dB | -110 dB |
| Pérdidas por obstrucción, edificios vecinos | -40 dB | -40 dB | -40 dB |
| Ganancia de la antena donante | 12 dB | 12 dB | 12 dB |
| Pérdida del cable, puente-conector | -2 dB | -2 dB | -2 dB |
| (Entrada en el repetidor) | (-85 dBm) | (-85 dBm) | (-85 dBm) |
| Ganancia del repetidor | 65 dB | 65 dB | 65 dB |
| (Salida del repetidor) | (-20 dBm) | (-20 dBm) | (-20 dBm) |
| Pérdida del distribuidor | -5 dB | -5 dB | -5 dB |
| Pérdida del cable, puente-conector | -2 dB | -3 dB | -4 dB |
| Ganancia de la antena de servicio del repetidor | 7 dB | 7 dB | 7 dB |
| Pérdidas en el interior del edificio | -12 dB | -12 dB | -12 dB |
| Pérdidas en la estación móvil | -2 dB | -2 dB | -2 dB |
| Nivel de señal de enlace descendente en el receptor de la estación móvil | -34 dBm | -35 dBm | -36 dBm |

Puede hacerse una comparación de los balances de potencia antes de haber instalado el repetidor y después de la instalación. Es notable que la señal en el interior del edificio se mejora considerablemente, incluso con el repetidor trabajando con su mínima ganancia en el enlace descendente.

La limitación en el enlace ascendente puede reducirse aún más incrementando la ganancia del repetidor para dicho enlace. De ser así, la estación móvil ajustaría sus niveles de transmisión de acuerdo con el nivel de potencia en la entrada del repetidor.

En este ejemplo, el repetidor llena un área de señal nula y brinda el ajuste de ganancia independiente que se necesita para lograr la paridad de nivel de señal entre el enlace ascendente y el enlace descendente.

3.2 Aplicaciones de repetidores para reducción de estaciones base

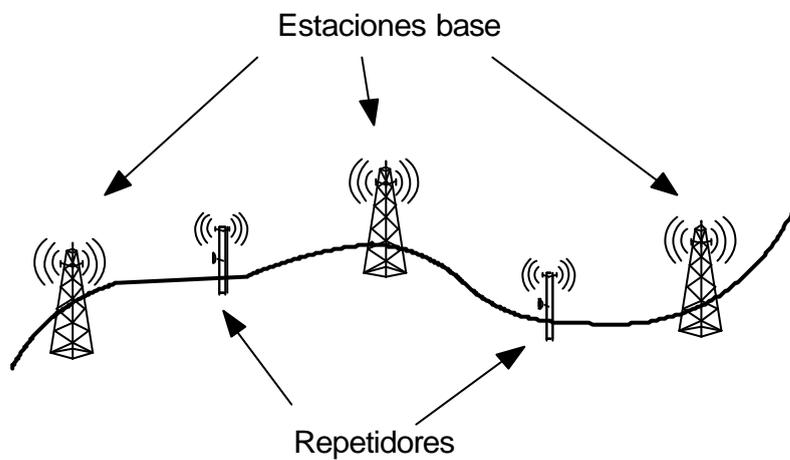
Los repetidores comúnmente se han utilizado para rellenar agujeros de RF y proveer cobertura en interiores. En general, los repetidores podrían utilizarse para extender el rango de cobertura, principalmente en carreteras, proveer cobertura por dispersión a pueblos pequeños y otras aplicaciones más recientes que pueden permitir una reducción del 40% al 60% de estaciones base en la red celular.

Esta reducción significativa de estaciones base se puede lograr sustituyendo algunas ya existentes por repetidores, o instalando un repetidor en vez de una nueva estación base. Por consiguiente, se podría también realizar una reducción de costos significativa en el crecimiento de una red celular, ya que el equipo de las estaciones base sustituidas se puede utilizar en nuevos sitios.

La extensión de rango es una aplicación de los repetidores que permite la cobertura de carreteras, rutas y otros tramos largos.

La siguiente figura muestra una aplicación típica de extensión de rango, a lo largo de una carretera que conduce a un área rural. Los repetidores se utilizan para extender el rango de la estación o estaciones base, a través de toda la carretera.

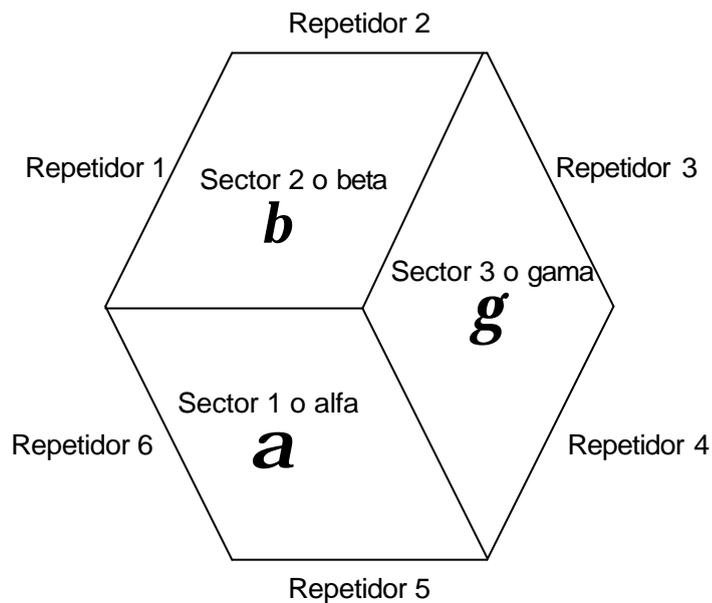
Figura 17. Repetidores en extensión de rango



La figura describe un sistema que puede resultar en una reducción de estaciones base cerca del 50%. El tramo de carretera originalmente contenía cinco estaciones base, ahora bien, al colocar los dos repetidores como se muestra, el número de estaciones base fue reducido a solamente tres.

Otra aplicación que podría permitir una reducción de estaciones base del 40% al 60% es la extensión de área de cobertura. La siguiente figura muestra la configuración de dicha aplicación.

Figura 18. Extensión de área



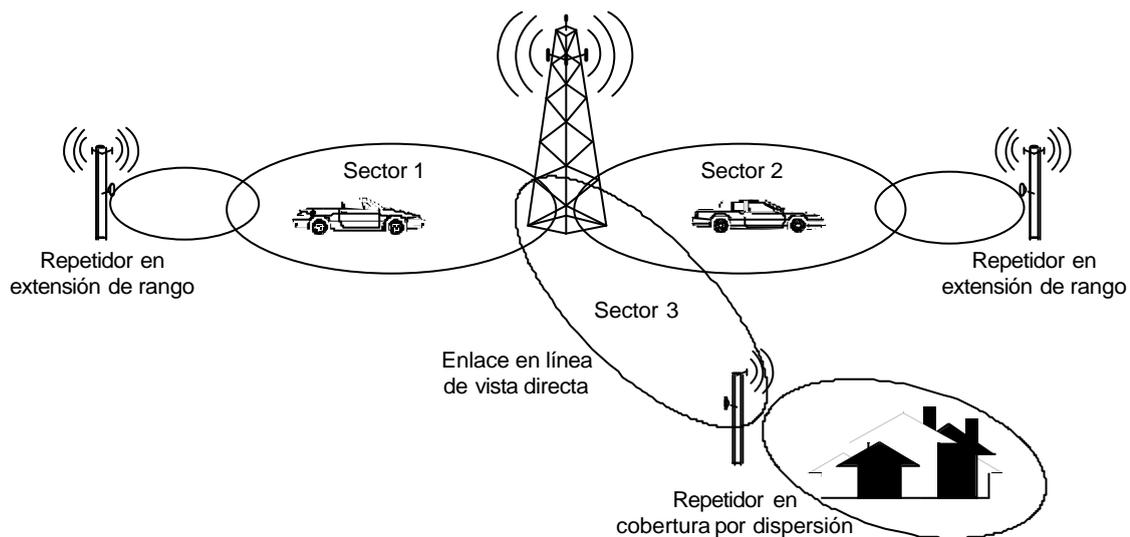
Como se puede apreciar en la figura, dos repetidores se requieren para cada sector de la estación base, de modo que se pueda extender sistemáticamente el área de cobertura de dicha estación. Seis sitios de repetición serían requeridos, por cada estación base.

Desde un punto de vista económico, la adquisición de siete sitios (contando la estación base), más el número de repetidores e infraestructura; no tendría ningún beneficio. De igual forma, debido a la cantidad de repetidores enlazados a una sola estación base, se encontrarían algunos aspectos técnicos un tanto complejos. Por esto mismo, la extensión de área de cobertura no es recomendada, y generalmente, no se utiliza.

De igual forma que la extensión de rango, la “cobertura por dispersión” es un aplicación talvez menos utilizada, pero puede permitir una reducción de estaciones base entre el 40% y 60%.

La siguiente figura muestra una aplicación típica de extensión de rango, a lo largo de un tramo de carretera. Fuera de la carretera se encuentra un nuevo proyecto de viviendas. Desafortunadamente, ninguna de las estaciones base en la carretera puede alcanzar tales viviendas. En vez de instalar una nueva estación base para proveer el servicio a las nuevas viviendas, un repetidor puede ser configurado, enlazándolo a una de las estaciones bases de la carretera, para poder proveer servicio al nuevo proyecto de viviendas.

Figura 19. Cobertura por dispersión



La reducción de la cobertura de la carretera por la adición del repetidor, se evita configurando el repetidor en otro sector adicional, en una de las dos estaciones bases, de modo que dicho sector no contribuya a la cobertura de la carretera, como se aprecia en la figura.

Los costos adicionales del tercer sector pueden dejarse fuera de consideración, mayormente si se tienen varios repetidores enlazados a éste, para permitir más dispersión de la señal de RF y así proveer cobertura a una región más grande. De aquí surge el nombre de “cobertura por dispersión”.

Ahora bien, si se habla de extensión de rango, el repetidor necesariamente recibe una señal de RF débil de la estación base donante. El repetidor amplifica dicha señal y la retransmite más allá del rango de cobertura de la estación base.

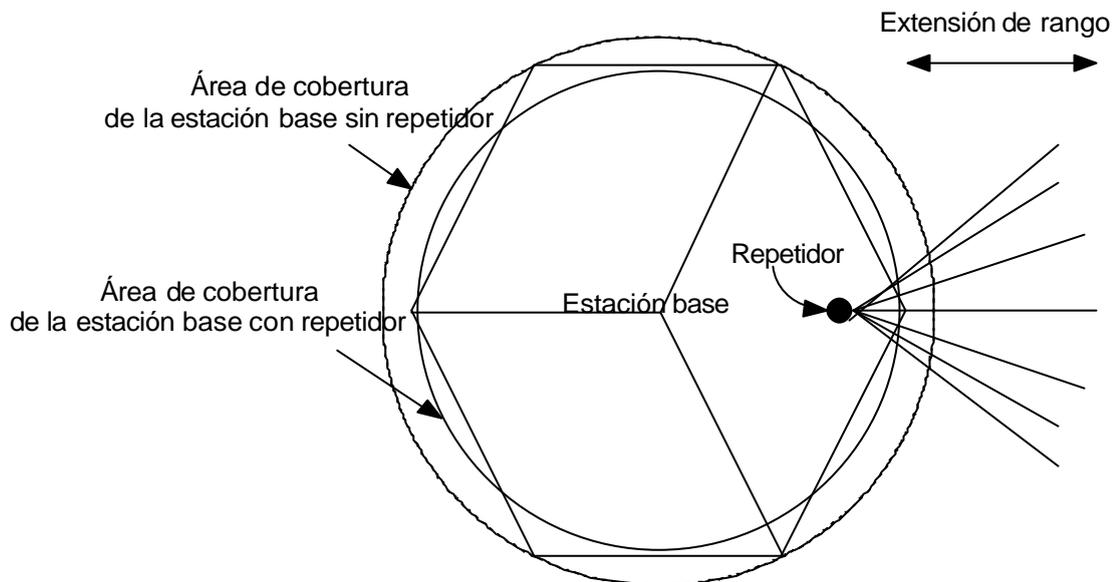
En el enlace reverso, la señal originada en la estación móvil es amplificada para alcanzar la estación base donante. En el enlace directo, la señal originada en la estación base donante es amplificada para alcanzar el receptor en la estación móvil. En la extensión de rango, las señales amplificadas extienden el alcance de RF de la estación móvil y la estación base donante.

El precio de la amplificación de la señal es desde luego, más ruido. En el enlace reverso, el ruido se incrementa debido al repetidor y produce una reducción en el área de cobertura original de la estación base donante. En el enlace directo, el ruido agregado por el repetidor produce una reducción en el alcance del móvil, en comparación a la cobertura original de la estación base donante.

La razón de esta reducción de cobertura es debida a que el repetidor produce ruido que desensibiliza los receptores, tanto de la estación base como de la estación móvil. Cuando la cobertura de la estación base donante es reducida, la cobertura del repetidor también es reducida. Como se mencionó en el primer capítulo, los repetidores en este caso pueden extender la cobertura de la estación base donante, pero no pueden proporcionar más capacidad de tráfico al sistema.

La siguiente figura muestra la extensión de rango producida por un repetidor posicionado cerca de la frontera de cobertura de la estación base. Esta cobertura, como ya se mencionó, se encuentra reducida debido a la adición de ruido debido al repetidor. También puede observarse que esta configuración es muy parecida a las aplicaciones típicas de un repetidor: relleno de agujeros de RF o cobertura de interiores.

Figura 20. Extensión de rango sin antena trasera

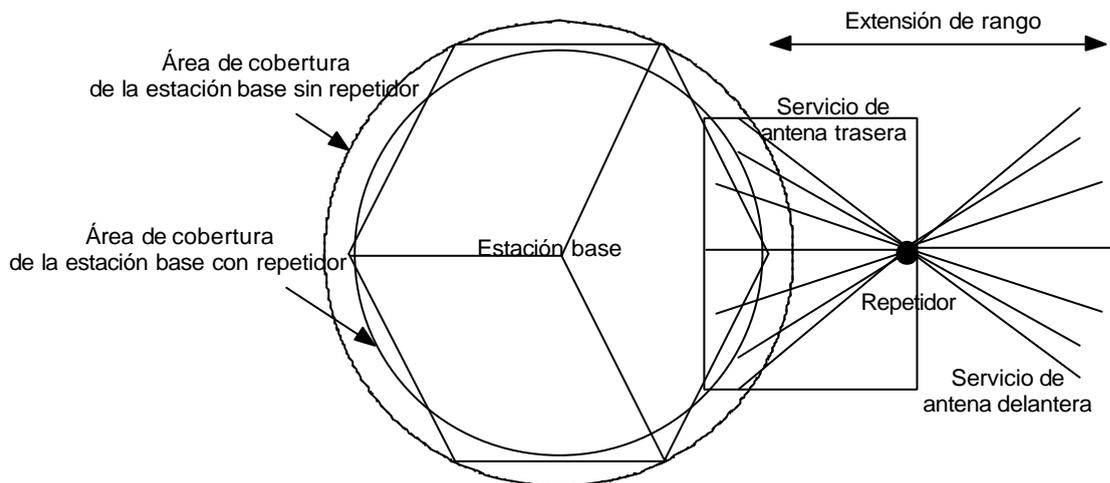


La antena de servicio del repetidor, radia ondas de RF más allá de la estación base donante, para llenar agujeros de RF o extender el rango de cobertura de la estación base donante. El repetidor toma la señal de la estación base por medio de su antena donante y la retransmite por medio de su antena de servicio.

En el caso anterior se utilizó únicamente una antena de servicio para proveer la cobertura de RF necesaria. Para aprovechar al máximo el repetidor en extensión de rango de cobertura, es recomendable utilizar una configuración de dos sectores.

La configuración de dos sectores utiliza dos antenas de servicio, una en dirección a la estación base donante, a la cual se le llama “antena trasera” y otra en dirección a la zona de servicio, la cual recibe el nombre de “antena delantera”. Estas antenas son combinadas por un acoplador que permita la combinación o división de la potencia de RF entre ellas. En la siguiente figura se muestra el uso de esta configuración con un acoplador de 6 dB. El 25% de la energía del enlace descendente es radiada por la antena trasera y el 75% de la energía es radiada por la antena delantera.

Figura 21. Extensión de rango con dos sectores



La antena o antenas traseras permiten que el repetidor pueda ser posicionado fuera de la cobertura reducida de la estación base donante.

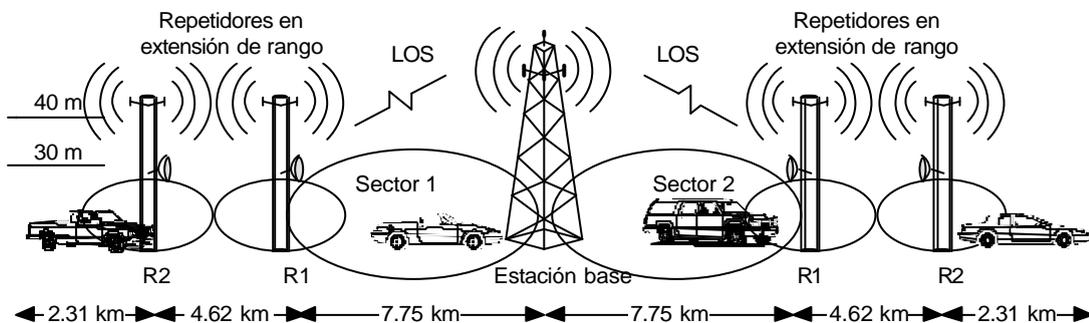
La antena delantera extiende el rango de cobertura de la estación base, más allá de su rango original. El repetidor puede contar con varias antenas de servicio (traseras y delanteras), para aprovechar la diversidad de espacio. La diversidad de espacio provee una extensión de rango adicional, en comparación a los repetidores sin diversidad.

La antena donante puede ser de preferencia, una antena con 25 dB de ganancia, de tipo parabólico. Esta alta ganancia permite que el repetidor pueda ser posicionado aún más lejos de la estación base donante. Estas antenas son comúnmente utilizadas en enlaces punto a punto de microondas, de 2 GHz, con un diámetro aproximadamente de 1.2 metros.

La configuración de antenas delanteras y traseras extiende mucho más el rango y reduce las tendencias del repetidor a degradar el sistema.

Los repetidores en carreteras o tramos largos, también pueden ser conectados en cascada. Véase el siguiente ejemplo, demostrando que con torres de 40 metros es posible cubrir distancias considerables, tal y como se muestra en la siguiente figura.

Figura 22. Repetidores en cascada para extensión de rango



Como en la mayoría de los sistemas móviles, la cobertura de una carretera es limitada en el enlace ascendente. Las torres elevadas pueden asegurar la propagación en línea de vista directa, entre los repetidores, pero finalmente se debe alcanzar una estación móvil en tierra, lo cual implica el uso de uno de los modelos de propagación sobre tierra plana.

En la figura se observa el rango de enlace descendente que puede esperarse con 42 dBm de salida de potencia del transmisor en la estación base, con una altura de torre y una ganancia de antena adecuadas. Se optó por una torre de 40 metros de altura y una antena de 17 dB de ganancia. Para determinar la pérdida y la sensibilidad del receptor, se despejó x , suponiendo un nivel de recepción de -95 dBm en la estación móvil. El cálculo quedaría de la siguiente forma:

$$42 - 2 + 17 - x - 6 = -95 \text{ dBm}$$

Donde:

-95 dBm = nivel de recepción en la estación móvil.

42 dBm = 16 vatios de salida de la estación base.

-2 dB = pérdidas por cable y conectores.

17 dB = ganancia de la antena de la estación base.

-6 dB = pérdidas en la estación móvil dentro del automóvil.

Despejando x , se tiene como resultado $x = 146$ dB. Es decir, que con una torre de 40 metros ($H_t = 130$ pies), una antena con ganancia de 17 dB y una pérdida de -6 dB en el móvil a una altura de 1.8 metros ($H_r = 6$ pies), es posible emitir una señal de -95 dBm en un receptor, con una pérdida de trayectoria de -146 dB. Si se aplica la fórmula Egli, para la distancia sobre una trayectoria de 146 dB, se obtiene:

$$D = \log^{-1} \left[\frac{146 - 117 - 20 \log(1900) + 20 \log(130 * 6)}{40} \right] = 3.40 \text{ millas} = 5.44 \text{ kilómetros}$$

Se ha calculado, que a una distancia de 5.44 kilómetros, la estación base alcanza al receptor de la estación móvil con -95 dB.

Ahora bien, considérese el enlace descendente desde cada una de las cuatro estaciones repetidoras. Cada estación repetidora emite 33 dBm (2 vatios) de potencia compatible con la máscara *CDMA* en el enlace descendente desde el repetidor.

En forma similar que en los cálculos sobre la estación base, se toma un nivel de recepción de la estación móvil de -95 dBm, y para este caso, un nivel de potencia de salida del repetidor de 33 dBm.

Como los repetidores tienen una configuración de dos sectores, debe tomarse en cuenta la potencia de salida transmitida para cada una de las dos direcciones. En este caso, se utiliza un acoplador de 3 dB que divide la señal en el 50% de potencia para la antena trasera y el otro 50% para la antena delantera.

El cálculo para una potencia de salida de 30 dBm en el repetidor queda de la siguiente forma:

$$30 - 3 - 2 + 17 - x - 6 = -95 \text{ dBm}$$

Donde:

-95 dBm = nivel de recepción en la estación móvil.

30 dBm = 50% de 2 vatios de salida del repetidor (1 vatio).

-3 dB = pérdida debida al acoplador.

-2 dB = pérdidas por cable y conectores.

17 dB = ganancia de la antena trasera del repetidor.

-6 dB = pérdidas en la estación móvil dentro del automóvil.

Despejando x , se tiene como resultado $x = 131$ dB. Es decir, que con una torre de 40 metros, una antena con ganancia de 17 dB y una pérdida de -6 dB en el móvil a una altura de 1.8 metros, es posible emitir una señal de -95 dBm en un receptor, con una pérdida de trayectoria de -131 dB. Si se aplica la fórmula Egli, para la distancia sobre una trayectoria de 131 dB, se obtiene:

$$D = \log^{-1} \left[\frac{131 - 117 - 20 \log(1900) + 20 \log(130 * 6)}{40} \right] = 1.43 \text{ millas} = 2.31 \text{ kilómetros}$$

El repetidor entonces alcanza al receptor de la estación móvil con -95 dB, en una distancia de 2.31 kilómetros.

Tomando en cuenta la distancia calculada desde la estación base a la estación móvil (5.44 km) se tiene una distancia total de la estación base al repetidor de 7.75 kilómetros, y como la configuración de los repetidores en cascada es la misma, la distancia entre cada repetidor es entonces de 4.62 kilómetros.

Habiendo establecido las distancias entre las torres, el próximo paso es calcular los detalles en lo que respecta a la parte “primaria” del sistema: el enlace entre las torres. Es necesario que exista una trayectoria rectilínea entre las torres y se ha determinado una configuración del repetidor con las antenas de servicio a una altura de 40 metros y la antena donante a una altura de 30 metros. La separación vertical de 10 metros entre las antenas garantiza un aislamiento adecuado entre el enlace ascendente y descendente.

Utilizando la fórmula Egli para una distancia de 7.75 kilómetros y una altura de antenas de 40 y 30 metros, la pérdida de trayectoria calculada entre la estación base y el primer repetidor es de -128 dB. La pérdida de trayectoria entre los repetidores, separados por una distancia de 4.62 kilómetros, es de -119 dB. Esta información permite determinar los niveles de potencia de enlace sumando las ganancias y pérdidas como se hizo anteriormente.

La señal del enlace descendente primario desde el transmisor base hasta el primer repetidor es:

$$42 - 2 + 17 - 128 + 22 - 2 + x = 30 \text{ dBm}$$

Donde:

30 dBm = 1 vatio de potencia de salida del repetidor #1.

42 dBm = potencia de salida de la estación base.

-2 dB = pérdidas por cables y conectores.

17 dB = ganancia de la antena de la estación base.

-128 dB = pérdida de la trayectoria.

22 dB = ganancia de la antena donante del repetidor #1.

-2 dB = pérdidas por cables y conectores.

x = ganancia del repetidor #1.

Despejando x, se tiene $x = 81$ dB. Esta es la ganancia que se requiere para que el primer repetidor pueda obtener la mitad de potencia nominal de salida máxima (30 dBm).

El enlace descendente primario entre los dos repetidores se puede calcular de la misma forma,

$$30 - 3 - 2 + 17 - 119 + 22 - 2 + x = 30 \text{ dBm}$$

Donde:

30 dBm = 1 vatio de potencia de salida del repetidor # 2.

30 dBm = 1 vatio de potencia de salida del repetidor #1.

-3 dB = pérdida del acoplador.

-2 dB = pérdidas por cables y conectores.

17 dB = ganancia de la antena de servicio del repetidor #1.

-119 dB = pérdida de la trayectoria.

22 dB = ganancia de la antena donante del repetidor #2.

-2 dB = pérdidas por cables y conectores.

x = ganancia del repetidor # 2.

Despejando x , se tiene $x = 87$ dB. Esta es la ganancia que se requiere para que el segundo repetidor pueda obtener la mitad de potencia nominal de salida máxima (30 dBm).

Ahora solo deben calcularse los valores de ganancia del enlace ascendente primario. Las pérdidas de trayectoria siguen siendo las mismas: desde la estación móvil al repetidor # 2, -131 dB; desde el repetidor # 2 al repetidor # 1, -119 dB; y desde el repetidor # 1 a la estación base donante, -128 dB. Supóngase que la señal de enlace ascendente en cada receptor es de -102 dB.

A continuación se muestran los balances de potencia para el enlace ascendente y descendente del problema en cuestión, suponiendo el caso de un móvil dentro del área de servicio del repetidor #2, transmitiendo a su máxima potencia.

Tabla IX. Balance de potencias del enlace ascendente para los repetidores en cascada en extensión de rango

| Balance de potencias del enlace ascendente | |
|--|------------|
| Potencia de salida de la estación móvil | 23 dBm |
| Pérdidas en el móvil | -6 dB |
| Pérdidas de trayectoria | -131 dB |
| Ganancia de la antena de servicio del repetidor #2 | 17 dB |
| Pérdidas por cables y conectores | -2 dB |
| Pérdida del acoplador | -3 dB |
| (Nivel de señal de enlace ascendente en el receptor del repetidor #2) | (-102 dBm) |
| Ganancia del repetidor #2 | 87 dB |
| (Nivel de señal de salida para el repetidor #2) | (-15 dBm) |
| Pérdidas por cables y conectores | -2 dB |
| Ganancia de la antena donante del repetidor #2 | 22 dB |
| Pérdidas de trayectoria | -119 dB |
| Ganancia de la antena de servicio del repetidor #1 | 17 dB |
| Pérdidas por cables y conectores | -2 dB |
| Pérdida del acoplador | -3 dB |
| (Nivel de señal de enlace ascendente en el receptor del repetidor #1) | (-102 dBm) |
| Ganancia del repetidor #1 | 90 dB |
| (Nivel de señal de salida para el repetidor #1) | (-12 dBm) |
| Pérdidas por cables y conectores | -2 dB |
| Ganancia de la antena donante del repetidor #1 | 22 dB |
| Pérdidas de trayectoria | -128 dB |
| Ganancia de la antena de servicio de la estación base | 17 dB |
| Pérdidas por cables y conectores | -2 dB |
| Nivel de señal de enlace ascendente en el receptor de la estación base | -105 dBm |

Tabla X. Balance de potencias del enlace descendente para los repetidores en cascada en extensión de rango

| Balance de potencias del enlace descendente | |
|--|-----------|
| Potencia de salida de la estación base | 42 dBm |
| Pérdidas por cables y conectores | -2 dB |
| Ganancia de la antena de servicio de la estación base | 17 dB |
| Pérdidas de trayectoria | -128 dB |
| Ganancia de la antena donante del repetidor #1 | 22 dB |
| Pérdidas por cables y conectores | -2 dB |
| (Nivel de señal de enlace descendente en el receptor del repetidor #1) | (-51 dBm) |
| Ganancia del repetidor #1 | 81 dB |
| (Nivel de señal de salida para el repetidor #1) | (30 dBm) |
| Pérdida del acoplador | -3 dB |
| Pérdidas por cables y conectores | -2 dB |
| Ganancia de la antena de servicio del repetidor #1 | 17 dB |
| Pérdidas de trayectoria | -119 dB |
| Ganancia de la antena donante del repetidor #2 | 22 dB |
| Pérdidas por cables y conectores | -2 dB |
| (Nivel de señal de enlace descendente en el receptor del repetidor #2) | (-57 dBm) |
| Ganancia del repetidor #2 | 87 dB |
| (Nivel de señal de salida para el repetidor #2) | (30 dBm) |
| Pérdida del acoplador | -3 dB |
| Pérdidas por cables y conectores | -2 dB |
| Ganancia de la antena de servicio del repetidor #2 | 22 dB |
| Pérdidas de trayectoria | -131 dB |
| Pérdidas en el móvil | -6 dB |
| Nivel de señal de enlace descendente en el receptor de la estación móvil | -90 dBm |

Puede notarse que la señal de enlace ascendente recibida por la estación base es de -105 dBm, esto se debe a que no puede incrementarse la ganancia del repetidor #1 a más de 90 dB, debido a la limitación impuesta por el aislamiento (100 dB).

Sin embargo en las estaciones repetidoras si se logra tener una señal de enlace ascendente de -102 dB, con la estación móvil transmitiendo a 23 dBm.

En síntesis, se ha visto que los sitios de las torres se estiman según la potencia de transmisión de enlace descendente, desde la estación base y los sucesivos repetidores. Luego, debe confirmarse que las estaciones móviles puedan transmitir en forma directa a cada receptor de enlace ascendente.

Debido a las limitaciones del enlace ascendente, con frecuencia es necesario utilizar amplificadores ubicados en el extremo de la torre en cada enlace ascendente. Luego de fijar las distancias con base en los rangos desde la torre hasta la estación móvil, se establece la porción de transmisión entre torres, es decir, la parte primaria del sistema de repetidores. La amplia gama de ajuste de ganancia en los repetidores, permite un manejo eficiente del nivel de transmisión entre torres. Por lo tanto, es posible utilizar antenas más económicas de menor ganancia, en determinadas partes de la transmisión primaria.

3.3 Análisis de desempeño de un repetidor en un sistema *CDMA PCS*

Hasta ahora se han visto ya los diferentes parámetros por considerar en el diseño de una red híbrida de repetidores. Esto es, como ya se ha mencionado, una red de telefonía celular *CDMA PCS* con repetidores utilizados en diferentes aplicaciones. Se han estudiado algunas de las aplicaciones más importantes de los repetidores, incluyendo aquellas que pueden permitir una reducción de estaciones base en la red celular.

Ahora bien, cuando se habla del desempeño de un repetidor en un sistema de telefonía celular, debe considerarse no solo el diseño del sistema de repetición, sino también, el diseño de todo el sistema. No se pueden dar conclusiones acerca del desempeño de un repetidor de forma aislada.

De esta manera, el análisis de desempeño de un repetidor es un tanto complejo. Sin embargo, en esta sección se hará el análisis de solamente un repetidor, utilizado en extensión de rango a lo largo de un tramo de carretera, y así, se podrá determinar si los repetidores son una buena opción para el crecimiento de una red celular o no.

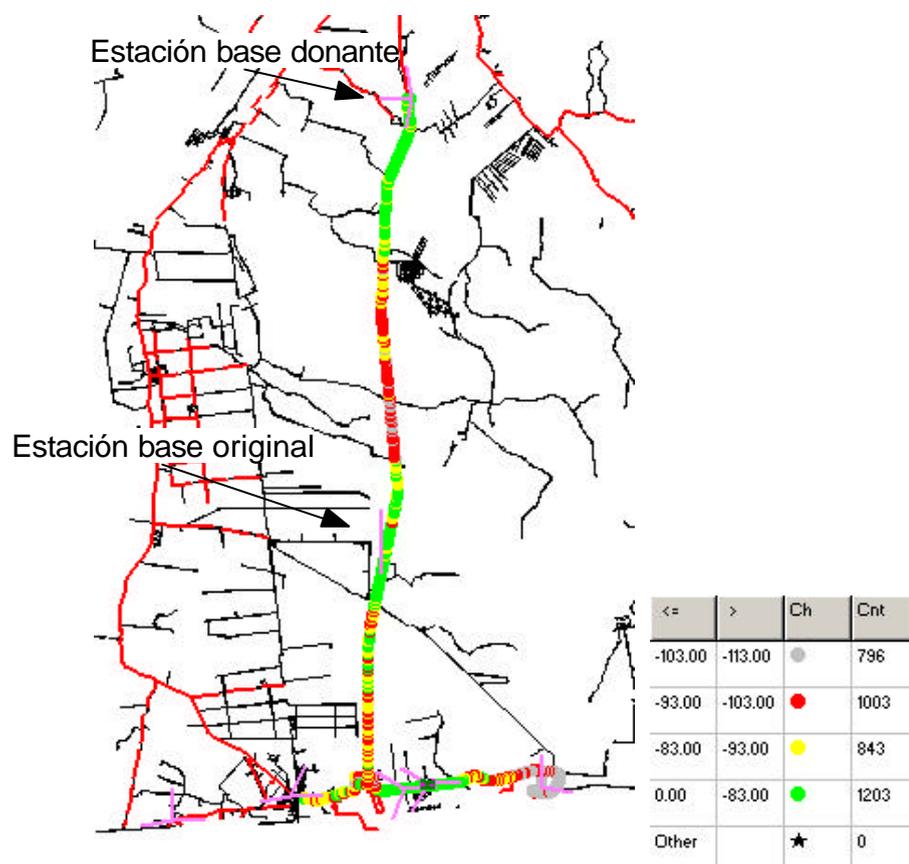
El problema por analizar es el siguiente: un operador de *PCS* en su diseño inicial del sistema consideró utilizar estaciones base para dar cobertura a un tramo de carretera de aproximadamente 40 kilómetros de largo, ubicado en el departamento de Escuintla. Sin embargo, ante la posibilidad de reducir los costos de ampliación de su red, ha decidido sustituir una estación base que provee servicio a esa carretera por un repetidor, y así utilizar el equipo de la estación base en otro sitio.

Antes de analizar el diseño del sistema de repetición, realícese un análisis del sistema cuando aún se encontraba la estación base original.

La distancia de separación entre la estación base original y la estación base que se tomará como donante, es de aproximadamente 20 kilómetros y el rango de cobertura de esta estación es de aproximadamente 10 kilómetros para cada sector. Como es de esperarse, la estación base original tiene solamente dos sectores, configurados a 180° uno del otro.

La siguiente figura muestra los niveles de recepción, medidos en el tramo de carretera, contando la estación base donante y la estación base original que se sustituirá por el repetidor.

Figura 23. Niveles de recepción con la estación base original

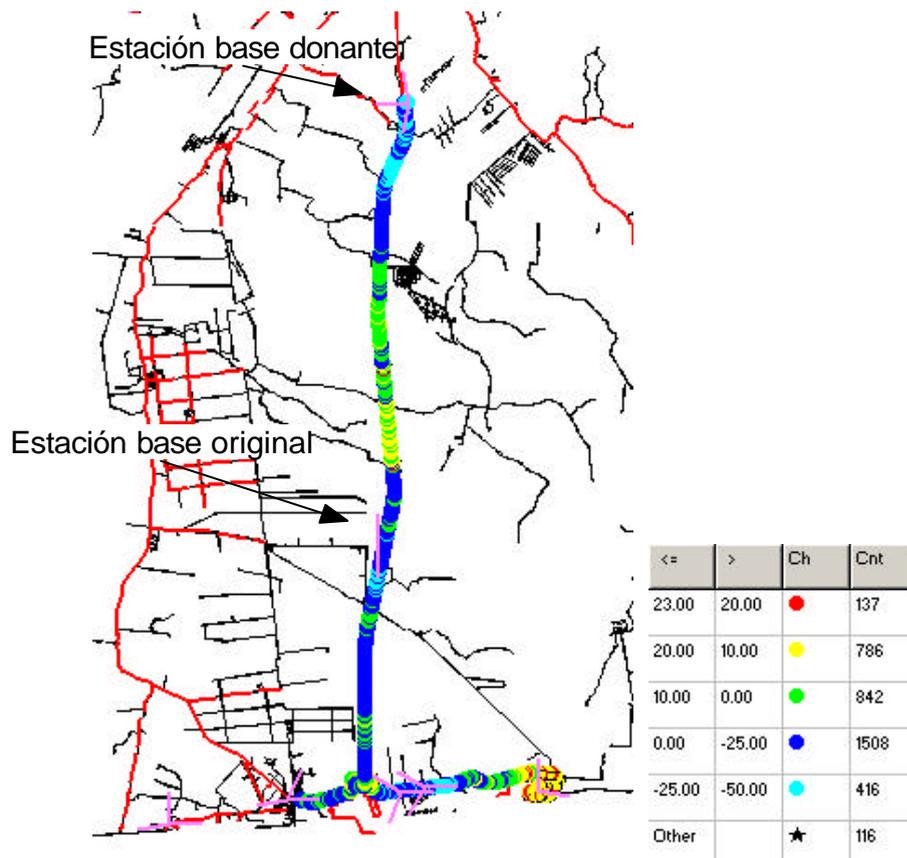


Un valor mayor a los -83 dB se considera como un buen nivel de recepción. El intervalo entre los -83 dB y -93 dB es un nivel de recepción aceptable. Un valor entre -93 dB y -103 dB ya es un nivel de recepción malo, y valores entre -103 dB y -113 dB son valores no deseables.

En la figura puede observarse que la señal es buena en los tramos cercanos a las estaciones base, y como es de esperarse, a medida que la unidad móvil se aleja de éstas, la señal se degrada proporcionalmente con la distancia de separación. En este caso, como se habla de niveles de recepción, se está refiriendo al enlace descendente.

Para el enlace ascendente, véase en la siguiente figura los niveles de transmisión de la unidad móvil hacia las estaciones base.

Figura 24. Niveles de transmisión con la estación base original



Un valor entre los -50 a -25 dBm es un muy buen nivel de transmisión. Un valor entre -25 y 0 dBm es un buen nivel de transmisión. Entre 0 y 10 dBm se considera un nivel de transmisión aceptable. Un valor entre 10 y 20 dBm ya es un nivel de transmisión malo y por último, un valor entre 20 y 23 dBm ya es un nivel de transmisión no deseable.

De la misma manera que en el enlace descendente, puede observarse que los niveles de transmisión de la unidad móvil son bastante buenos en los tramos cercanos a las estaciones base, y en este caso, aumentan proporcionalmente a medida que se aleja de éstas.

Como se pudo observar en las gráficas anteriores, el sistema está operando bastante bien; existe continuidad en la señal en el enlace descendente, así como también en el enlace ascendente. Pero, ¿qué pasaría si se pudiera reducir el costo de cobertura, sustituyendo una de las estaciones base por un repetidor? ¿qué ventajas y desventajas tendría el sistema de repetición, en comparación al sistema existente?

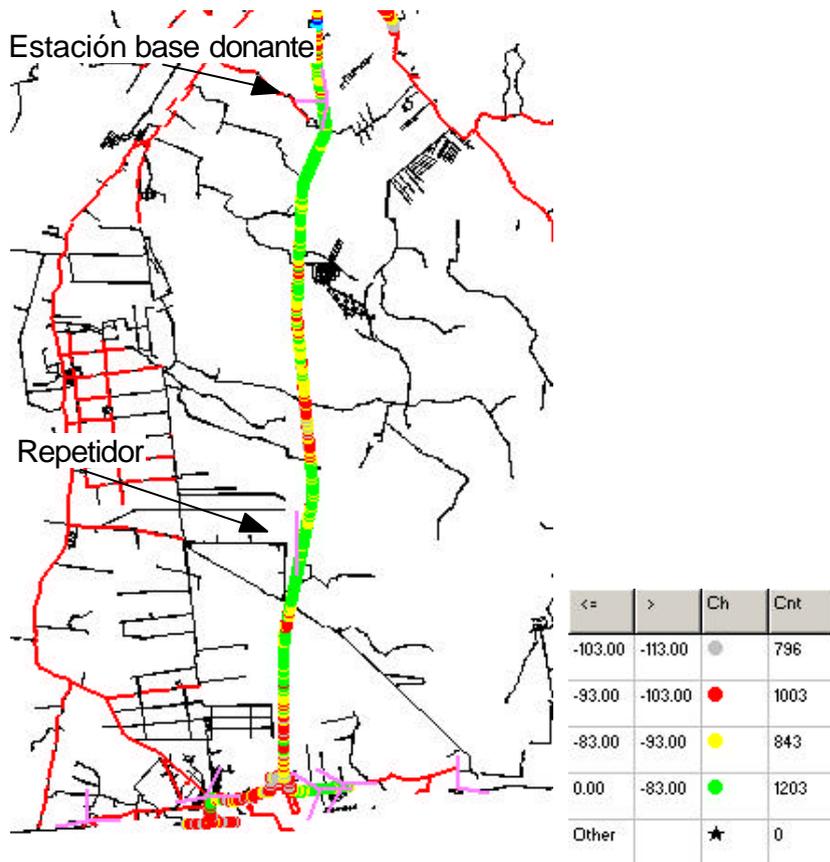
Para poder dar respuesta a las preguntas anteriores, se procede al análisis del diseño del sistema de repetición.

Tomando en cuenta la distancia de separación de 20 km entre el repetidor y la estación base donante, en la frecuencia de 1900 MHz, se tiene una pérdida de espacio libre de 120 dB. Por esta razón, se utiliza una antena donante parabólica con 28 dB de ganancia. Las antenas de servicio de cada sector tienen una ganancia de 18 dB.

El repetidor se encuentra operando en su ganancia máxima, esto es 95 dB. Por lo tanto se deberían esperar como mínimo, unos 105 dB de aislamiento.

Véase en la siguiente figura los niveles de recepción en la unidad móvil al sustituir la estación base original por un repetidor.

Figura 25. Niveles de recepción con el repetidor

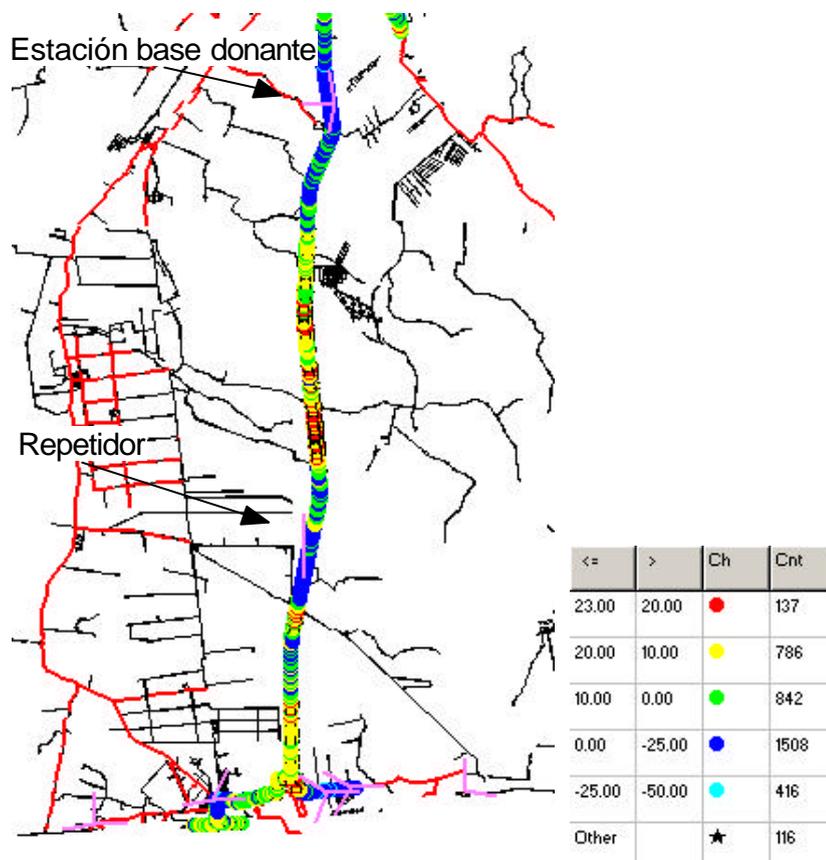


En la figura puede observarse que los niveles de recepción siguen siendo casi iguales, excepto en la zona inferior de toda la región, en donde la cobertura se degrada considerablemente.

En este caso, la señal en el enlace descendente y ascendente del repetidor, es la misma señal de la estación base donante, porque el repetidor amplifica y retransmite la señal en los dos sentidos.

Ahora véase en la siguiente figura, el caso del enlace ascendente, esto es la transmisión de la unidad móvil a través del repetidor hacia la estación base donante.

Figura 26. Niveles de transmisión con el repetidor



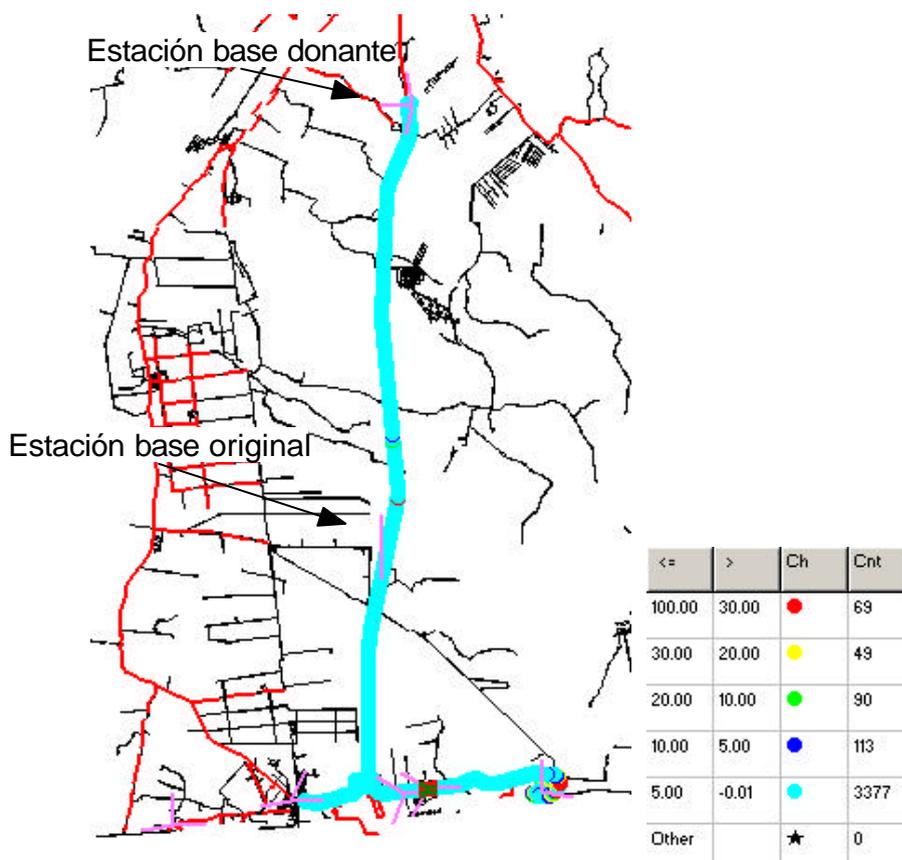
En esta figura puede observarse que los niveles de transmisión aumentan considerablemente en las regiones lejanas a la estación base y el repetidor. Esto se debe a que el sistema de repetición está limitado en el enlace ascendente.

Los niveles de transmisión y recepción que se han visto anteriormente permiten determinar si el desempeño del repetidor en el sistema es bueno o no.

Sin embargo, aún se puede dar una conclusión más acertada si se analizan los niveles de error vistos por la estación móvil. El usuario en realidad no se da cuenta de los niveles de transmisión o recepción de la estación móvil, pero sí puede notar el porcentaje de errores producidos por trama producidos en la unidad móvil. Estos niveles de error son vistos por el usuario como interferencia o comunicación entrecortada.

En la siguiente figura pueden verse los niveles de error en el sistema cuando aún se encontraba la estación base original.

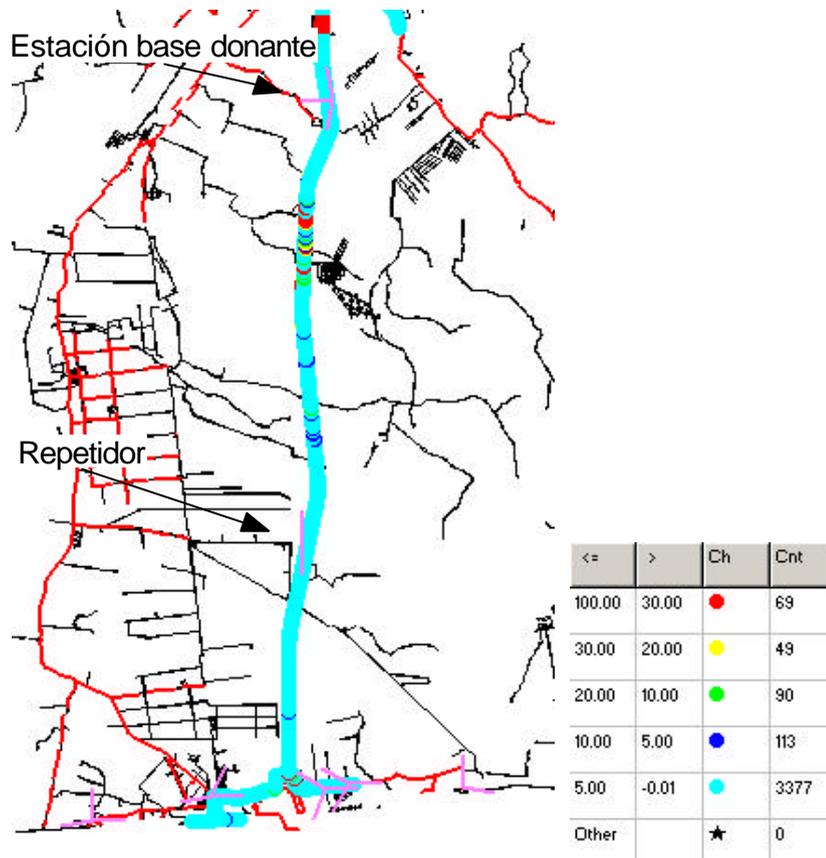
Figura 27. Niveles de error con la estación base original



Los niveles de error están dados en porcentaje. Es decir que en este caso, con la estación base original, el porcentaje de error por trama fue menor al 5% en toda la región.

Ahora véanse los niveles de error producidos, al introducir el repetidor en vez de la estación base original.

Figura 28. Niveles de error con el repetidor



Ahora puede observarse que en ciertas regiones, el porcentaje de error por trama se incrementó considerablemente. Sin embargo, en casi toda la región el porcentaje de error aún se mantuvo menor al 5%.

Desde el punto de vista técnico podría concluirse que en este caso en particular, la sustitución de la estación base por el repetidor no es la mejor solución para proveer cobertura al tramo de carretera.

Haciendo un análisis del sistema de repetición, se evidencia que existen más desventajas que ventajas, en comparación a como se encontraba el sistema anteriormente. Al utilizar el repetidor en vez de la estación base se han incrementado los niveles de transmisión de la unidad móvil en el sistema, y a la vez, se ha elevado el porcentaje de error por trama en ciertas regiones.

Debe tomarse en cuenta que en este caso, el diseño del sistema de repetición se hizo con base en los parámetros de instalación de la estación base original. Por ejemplo, el sitio de la estación base original se utilizó como sitio de repetición, teniendo entonces la misma distancia de separación hacia la estación base donante y por consiguiente, las mismas pérdidas de espacio libre.

Es posible que se hubieran obtenido mejores resultados si la distancia de separación entre la estación base donante y el repetidor fuera menor; y si en dado caso no se lograra dar cobertura a toda la carretera, podría entonces configurarse otro repetidor en cascada. De esta manera, los dos repetidores junto con la estación base donante darían servicio a todo el tramo de carretera, conservando también la calidad del sistema.

Para poder dar una conclusión final sobre el desempeño del sistema de repetición, debe analizarse también desde el punto de vista económico, determinando así los costos y beneficios obtenidos con la utilización del repetidor, en vez de la estación base. En el siguiente capítulo se realizará dicho análisis para el caso que se presentó anteriormente.

4. ANÁLISIS DE COSTOS Y BENEFICIOS EN EL CRECIMIENTO DE UN SISTEMA CDMA PCS UTILIZANDO REPETIDORES

A lo largo de los capítulos anteriores se ha estudiado la arquitectura de los repetidores, su configuración y parámetros de instalación, sus aplicaciones más comunes y aquellas aplicaciones que permiten una reducción de estaciones base en la red celular. También se ha visto un ejemplo real de un repetidor utilizado en extensión de rango para proveer cobertura a un tramo de carretera; haciendo un análisis de desempeño del sistema en esa región, antes y después de instalar el repetidor.

Hasta ahora se han analizado solamente los aspectos técnicos en el diseño y desempeño de una red híbrida de repetidores, sin tomar en consideración los aspectos económicos. En el presente capítulo se hará un breve estudio económico que permita determinar los costos y beneficios que se obtienen al utilizar repetidores en una red celular.

Un operador de *CDMA PCS* puede utilizar repetidores en su red, debido a dos razones básicas:

1. Los repetidores se utilizan simplemente como un método de solución para problemas de cobertura.
2. El operador desea realizar un crecimiento de su red celular, por lo que decide instalar nuevos sitios con repetidores; o bien, sustituir algunas estaciones base por repetidores, de manera que el equipo de las estaciones base se pueda utilizar en celdas nuevas.

En cualquiera de los dos casos deben tomarse en cuenta todos los aspectos técnicos que ya se han estudiado, tales como los parámetros de instalación y configuración del repetidor.

Cuando los repetidores son utilizados como un método de solución para problemas de cobertura, se habla entonces de las aplicaciones típicas de estos, relleno de agujeros de RF en exteriores o interiores.

Si los repetidores se utilizan para dar crecimiento a la red celular, se refiere entonces a las aplicaciones que permiten una reducción de estaciones base, tal como la extensión de rango de cobertura o la cobertura por dispersión.

Para realizar el estudio económico, se realizará un presupuesto de instalación de una nueva estación base, un presupuesto de instalación de un repetidor; y una comparación entre estos.

Sabiendo ya los costos de instalación de un repetidor, en comparación con los costos de instalación de una nueva celda, puede también hacerse una superposición de estos datos para el análisis de crecimiento de una red celular. Sin embargo, este análisis sería un tanto más complejo.

En el capítulo anterior se planteó el caso de un repetidor utilizado para rellenar el interior de un edificio empresarial de tres pisos. También se analizó el desempeño de un repetidor en un caso real, utilizado en extensión de rango sobre una carretera de 20 kilómetros de largo. Más adelante en este capítulo, se analizarán nuevamente los dos casos anteriores, ahora desde el punto de vista económico, y así se verán los beneficios obtenidos mediante la utilización del repetidor en cada caso.

A continuación véase un presupuesto realizado para la instalación de una nueva estación base, en un sistema *CDMA PCS*.

Tabla XI. Presupuesto para la instalación de una nueva estación base

| INSTALACIÓN DE UNA NUEVA ESTACION BASE | | |
|---|--|---------------------|
| | ESPECIFICACIONES | PRECIO (\$.) |
| Terreno | 10 x 15 metros Alquilado Comprado | 5,000 |
| Obra civil | Construcción del sitio: Limpieza y nivelación del terreno Construcción de muro perimetral Block y malla metálica Malla metálica Construcción de caseta Block Prefabricada Contenedor metálico Instalación eléctrica Acometida (10 KVA) Red de tierras para caseta y torre | 30,000 |
| | Construcción de torre: Autosoportada Monopolo o arriestrada | 40,000 |
| | Equipo de aire acondicionado | 5,000 |
| Enlace de microonda | E1's Potencia | 60,000 |
| Estación base | Alimentación Rectificadores y banco de baterías | 10,000 |
| | Celda con dos portadoras | 240,000 |
| | TOTAL | 390,000 |

Como se puede observar en la tabla anterior, existen algunos precios que varían de acuerdo al lugar de instalación, el tipo de construcción, o bien, la capacidad de la celda. Sin embargo, el costo global del proyecto oscila entre los \$. 300,000 a \$. 390,000. Ahora bien, véase el presupuesto para la instalación de un repetidor.

Tabla XII. Presupuesto para la instalación de un repetidor

| INSTALACIÓN DE UN REPETIDOR | | |
|------------------------------------|--|---------------------|
| | ESPECIFICACIONES | PRECIO (\$.) |
| Terreno | 10 x 7 metros Alquilado Comprado | 4,000 |
| Obra civil | Construcción del sitio: Limpieza y nivelación del terreno Construcción de muro perimetral Block y malla metálica Malla metálica Construcción de caseta Block Prefabricada Contenedor metálico Instalación eléctrica Acometida residencial (120/240 VAC) Red de tierras para caseta y torre | 15,000 |
| | Construcción de torre: Autosoportada Monopolo o arriostrada | 40,000 |
| | Equipo de aire acondicionado | 0 |
| Enlace de microonda | E1's Potencia | 0 |
| Repetidor | Alimentación | 0 |
| | Rectificadores y banco de baterías Antena donante | 6,000 |
| | Repetidor | 25,000 |
| | TOTAL | 90,000 |

Como puede observarse, para el caso de la instalación de un repetidor, se tiene una reducción significativa de costos de terreno, obra civil y equipo de radiocomunicaciones. El costo global para la instalación de un repetidor oscila entre \$. 75,000 y \$. 90,000.

Tomando los costos de instalación más altos como referencia (\$. 390,000 para la estación base y \$. 90,000 para el repetidor), puede verse que el costo de instalación de una nueva estación base es cuatro veces mayor al costo de instalación de un repetidor.

Analícese ahora el caso del edificio planteado en el capítulo anterior. Un edificio empresarial de tres pisos se encontraba aislado a la señal de RF proveniente de la estación base más cercana, a 1.5 kilómetros de distancia. Aparte de las pérdidas de trayectoria, edificios y estructuras cercanas añadían otro factor de pérdidas por obstrucción de la señal de RF. En el interior del edificio también existía otro factor de pérdidas que se incrementaba a medida que se bajaba de piso.

El problema de cobertura en el edificio se pudo haber resuelto, instalando una nueva estación base, buscando un sitio con línea de vista directa entre la estación base y el edificio, de modo que las pérdidas de trayectoria y por obstrucción fueran mínimas. Esta solución hubiera tenido un costo de \$. 390,000.

Por otro lado, la solución planteada en el capítulo tres fue la instalación de un repetidor en la parte superior del edificio, utilizando una antena de servicio para cada piso y una antena donante tipo yagui. El costo de esta solución es de solamente \$. 90,000.

Si se comparan los costos de estas dos soluciones, se encuentra que definitivamente la utilización del repetidor es de mayor beneficio económico para el operador. La instalación del repetidor en este caso cuesta cuatro veces menos en comparación a la instalación de la nueva estación base.

Ahora analícese el caso real planteado al final del capítulo tres. Una estación base que proveía cobertura a un tramo de carretera de 20 kilómetros se sustituyó por un repetidor de dos sectores. Esta sustitución reflejó ciertas desventajas a nivel técnico. La cobertura se degradó en cierto nivel. Debido a la limitación del enlace ascendente, los niveles de transmisión se incrementaron, y a la vez, el porcentaje de error por trama se incrementó en algunas regiones. Sin embargo, existen algunos beneficios económicos al realizar dicha sustitución.

En primer lugar, el costo de instalación del repetidor se redujo considerablemente, como ya se sabe, este costo es cuatro veces menor al costo de instalación de una nueva estación base. Ahora bien, en segundo lugar, puede hacerse un análisis de costos de producción. Esto es, los costos de cobertura por metro cuadrado.

Cuando estaba instalada la estación base original, esta cubría alrededor de 10 km de carretera en dirección a la estación base donante, y otros 10 km en dirección a la zona sur, cubriendo también un tramo perpendicular a la carretera principal, aproximadamente de 10 km de longitud. Esto quiere decir que si el costo de instalación de esa estación base fue de unos \$. 390,000, el costo de cobertura por cada metro cuadrados es:

$$\frac{390,000 \text{ U.S.}\$}{p(10000)^2 \text{ m}^2} = 0.001241 \frac{\text{U.S.}\$}{\text{m}^2}$$

Interpretando de mejor forma el dato anterior, el costo de cobertura por cada 100 metros cuadrados es de \$. 12. 41.

Ahora bien, véase cuál es el costo de producción de cobertura en la carretera utilizando el repetidor, tomando en cuenta una reducción de 2 km en la cobertura por cada sector, el costo de cobertura por metro cuadro es:

$$\frac{90,000 \text{ U.S.}\$}{\mathbf{p}(8000)^2 \text{ m}^2} = 0.000448 \frac{\text{U.S.}\$}{\text{m}^2}$$

Entonces, el costo de cobertura por cada 100 metros cuadrados es de \$. 4.48. Esto quiere decir que al sustituir el repetidor se tiene un beneficio económico que reduce los costos de producción en aproximadamente tres veces.

Se ha visto entonces, que a pesar de los costos técnicos obtenidos en la sustitución de la estación base por el repetidor, tales como el incremento de los niveles de transmisión en la unidad móvil y la interferencia ocasionada por el incremento de los niveles de error por trama en ciertas regiones; los beneficios económicos son considerables. Y en este caso, el equipo de la estación base que se ha sustituido puede ser utilizado en una nueva celda.

Como se mencionó anteriormente, de igual forma que se ha hecho este análisis, puede también hacerse una superposición, considerando un número mayor de estaciones base existentes, a sustituir por repetidores, o bien la instalación nueva de repetidores en sitios con señal nula en exteriores o interiores; tomando en cuenta en cada aplicación las consideraciones técnicas del caso.

CONCLUSIONES

1. Un repetidor es un amplificador bidireccional, que amplifica y retransmite las señales del enlace ascendente y descendente de un sistema de telefonía celular. La señal del enlace descendente es tomada de una estación base donante, por medio de una antena o una interconexión de fibra óptica o cable coaxial.
2. La configuración de un repetidor consiste en la realización de un estudio de sus parámetros de instalación; realizando cálculos matemáticos, estimaciones y mediciones reales de los mismos.
3. Una red híbrida de repetidores, es una red de telefonía celular con repetidores utilizados en diferentes aplicaciones. Las aplicaciones típicas de los repetidores, consisten en rellenar agujeros de RF en interiores o exteriores. Las aplicaciones que permiten una reducción de estaciones base del sistema, consisten, en la mayoría de casos, en la extensión del rango de cobertura de la estación base donante.
4. El análisis de desempeño de un sistema de repetición, toma en cuenta también el diseño de todo el sistema. No es posible dar conclusiones acerca del desempeño de un repetidor de forma aislada.
5. Si es posible realizar una reducción significativa de estaciones base en un sistema *CDMA PCS*, sustituyendo algunas de estas por repetidores utilizados, en la mayoría de casos, en extensión de rango de cobertura. Por consiguiente, es posible realizar un crecimiento del sistema utilizando el equipo de las estaciones base sustituidas, en nuevos sitios.

6. La utilización de repetidores en un sistema *CDMA PCS* permite una reducción significativa de costos en la solución de algunos problemas de cobertura, o bien, en el crecimiento de la red celular del sistema. Sin embargo se deben tomar en cuenta los costos técnicos debidos a su utilización.

RECOMENDACIONES

1. La elección del tipo de repetidor se debe realizar de acuerdo con la aplicación del mismo y las condiciones del problema en cuestión. Un repetidor inalámbrico permite una mayor reducción de costos que un repetidor interconectado por fibra óptica o cable coaxial.
2. De preferencia, se deben medir todos los parámetros de instalación y configuración del repetidor, para asegurar los cálculos de los balances de potencia y el buen desempeño del repetidor.
3. Es importante considerar el diseño del sistema en general, antes de diseñar un sistema de repetición de forma aislada. De preferencia, se deben conocer los parámetros de configuración de la estación base donante y las celdas vecinas.
4. Si existe un beneficio económico significativo en la utilización de un repetidor dando solución a un problema de cobertura, o bien, en sustitución de una estación base del sistema. Sin embargo, deben considerarse todos los aspectos de carácter técnico influyentes, de modo que si tienen un mayor peso, debe buscarse la solución mediante la utilización de cualquier otro equipo.
5. El análisis de costos y beneficios en el crecimiento de la red celular de un sistema *CDMA PCS* se puede realizar haciendo una superposición de cada caso en particular.

BIBLIOGRAFÍA

1. **ANDREW CORPORATION.** "Extensión de cobertura y llenado de áreas de señal nula utilizando el amplificador bidireccional de servicios de comunicaciones personales (PCS) *SelectAmp CDMA 1900 de Andrew*". *Application brief. (USA):* 1-13. 1999.
2. Galindo González, Adolfo y otros. "Repetidores de radio sobre fibra óptica para comunicaciones móviles celulares". *Telefónica Investigación y Desarrollo. (España):* 1-6. 2002.
3. **LUCENT TECHNOLOGIES.** *Autoplex electronic documentation.* USA: s.e. 1997.
4. **LUCENT TECHNOLOGIES.** *PCS range extension repeaters CDMA RF engineering guidelines.* USA: s.e. 1999. 56 pp.
5. **LUCENT TECHNOLOGIES.** *RF coverage, capacity and growth engineering of CDMA PCS (1900 MHZ) systems.* USA: s.e. s.a. 300 pp.
6. **MIKOM.** *User's manual for repeater MR701B Power.* Germany: s.e. 1999. 76 pp.
7. **REPEATER TECHNOLOGIES.** *Repeater engineering handbook.* USA: s.e. 1997. 130 pp.
8. **REPEATER TECHNOLOGIES.** "Rural highway back beam configuration". *Repeater 3G solutions. (USA):* 1-3. 2002.
9. **YANG, Samuel C.** *CDMA RF system engineering.* Boston-London: Artech House, Inc. 1998. 288 pp.