

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**"PROPUESTA DE SOLUCIÓN A LA FALTA DE COBERTURA
CELULAR EN LOS TÚNELES DEL CERRO DEL CARMEN"**

**PROYECTO DE TÓPICO DE GRADUACIÓN
Previa a la obtención del Título de:
INGENIERO EN ELECTRICIDAD
ESPECIALIZACION: ELECTRÓNICA**

Presentado por

**Otto Franco Sotomayor
Luis Torres Garcés**

**Guayaquil - Ecuador
2006**

DEDICATORIA


A Alicia, Otto M., Idelis, Gonzalo, Yuri.

A Luis S., Lina, Brenda, Amy y Omar.


AGRADECIMIENTO

Agradecemos al Ing. Washington Medina y a todas las personas que han hecho posible la realización del presente trabajo.


TRIBUNAL DE GRADUACION




Ing. Miguel Yapur
Subdecano FIEC



Ing. Washigton Medina M.
Director de Tesis



Ing. Sara Ríos O.
Vocal



Ing. Germán Vargas.
Vocal

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral".



Luis Torres Garcés



Otto Franco Sotomayor

RESUMEN

Un sistema celular puede dar servicio en amplias regiones casi sin interrupción. Con esta habilidad surge el deseo de usarlo por todas partes, y por eso los usuarios exigen más en sus expectativas para la cobertura. Este cambio en expectativas compromete a los proveedores de servicio a observar seriamente la posibilidad de proporcionar extensiones de sus sistemas en aquellas áreas donde los sistemas convencionales no pueden penetrar: edificios y túneles.

La cobertura dentro de edificios y túneles es el paso final para completar redes celulares. El cable coaxial radiante es un elemento eficaz entre los componentes para proporcionar estas soluciones de la cobertura de RF. Con herramientas de diseño simples, se puede obtener una comprensión mejor de cómo irradia el cable, de cómo funcionan los sistemas. Con un conocimiento de todos los factores que pueden afectar el diseño del sistema, se puede diseñar un sistema complejo en túneles o edificios combinando eficientemente coste y eficacia.

Los beneficios de usar cable radiante para la cobertura continua incluyen reducción en el potencial de bloqueo o sombra, reducción en los requerimientos de rango dinámico para los equipos, y mejoras potenciales en el

ancho de banda instantánea de la señal RF. Además, la capacidad multi-banda de muchos de los cables radiantes proporciona la posibilidad de manejo de servicios RF múltiples en un sistema.

Los cables radiantes son cables coaxiales con hendiduras en el conductor exterior, por donde se deja escapar una cantidad controlada de energía hacia el exterior.

INDICE GENERAL

| | |
|---|----|
| I. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE LA COBERTURA DE RF CELULAR EN ESTRUCTURAS SÓLIDAS..... | 1 |
| 1.1.- Presentando el problema..... | 1 |
| 1.2.- El bloqueo de la línea de vista..... | 2 |
| 1.3.- Rango dinámico en un sistema con cable radiante..... | 3 |
| 1.4.- Ancho de banda de la señal RF..... | 5 |
| 1.5.- Breve descripción de los sistemas que utilizan cable radiante..... | 7 |
| 1.5.1.- Agregando amplificadores para extender el sistema | 8 |
| 1.5.2.- Figura de ruido del Sistema..... | 11 |
| 1.5.3.- Minimizando la Intermodulación y la Figura del Ruido..... | 12 |
| 1.6.- Consideraciones preliminares de diseño de sistemas de túneles..... | 13 |
| 1.6.1.- Requerimientos Estructurales para el equipamiento..... | 15 |
| 1.7.- Consideraciones preliminares de diseño de sistemas de edificios..... | 16 |
| 1.7.1.- Manteniendo la apariencia..... | 16 |
| 1.7.2.- Instalaciones dificultosas..... | 17 |

| | |
|--|----|
| II. TÉCNICAS UTILIZADAS PARA LA COBERTURA EN TÚNELES Y EDIFICIOS..... | 18 |
| 2.1.- El cable coaxial con aberturas periódicamente espaciadas..... | 18 |
| 2.1.1.- Introducción..... | 18 |
| 2.1.2 .- El Modelo Difuso..... | 22 |
| 2.1.3.- Modelo Determinístico..... | 24 |
| 2.1.4.- Ejemplos de pruebas realizadas por Bell-Labs: Predicciones y Mediciones..... | 26 |
| 2.1.4.1.- En Edificios de Oficinas..... | 26 |
| 2.1.4.2.- Predicciones y Mediciones en una Bodega..... | 31 |
| 2.1.4.3.- Perdida de acoplamiento Estándar..... | 34 |
| 2.2 Microceldas y Sistemas de Antenas Múltiples con Fibra..... | 37 |
| 2.2.1 Objetivos y Características Generales..... | 37 |
| 2.2.2.- Características Técnicas..... | 38 |
| 2.2.3.- El BTS..... | 41 |

| | |
|--|----|
| 2.2.4.- Modulo de antena..... | 43 |
| 2.2.5.- Centro de Administración..... | 45 |
| 2.2.6.- Ejemplo de una instalación en un edificio..... | 46 |
| | |
| III. ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN, PÉRDIDAS Y RUIDO EN LOS SISTEMAS PARA COBERTURA EN TÚNELES..... | 49 |
| 3.1.- Potencia irradiada por cable radiante..... | 49 |
| 3.1.1.- Factor de perfil para el cable radiante..... | 55 |
| 3.2.- Pérdidas debida al cable radiante..... | 59 |
| 3.2.1. Pérdida longitudinal (perdida por inserción)..... | 59 |
| 3.2.2.- Pérdida por acoplamiento..... | 60 |
| 3.2.3 Ejemplo de análisis de pérdidas para un edificio de 3 pisos..... | 60 |
| 3.2.3.1 Datos del Edificio..... | 61 |
| 3.2.3.2.- Resultados..... | 64 |
| 3.3 Atenuación debida a una estructura sólida (utilizando antenas)..... | 72 |

| | |
|---|-----|
| IV. EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA COBERTURA EN TÚNELES Y EDIFICIOS..... | 74 |
| 4.1.- Suministro de Potencia para extensiones de red Celular..... | 74 |
| 4.2.- Diferentes maneras de extender las señales celulares..... | 75 |
| 4.2.1.- Sistema Antena-Antena..... | 76 |
| 4.2.2.- Sistemas de Antena-Cable..... | 78 |
| 4.3.- Potencia Eléctrica Requerida por los Sistemas de Extensión Celular... | 80 |
| 4.3.1.- Sistemas Antena-Antena..... | 81 |
| 4.3.2.- Sistemas Antena-Cable..... | 81 |
| 4.3.2.1.- Uso de potencia independiente del amplificador primario..... | 85 |
| 4.3.2.2.- Uso de potencia en paralelo con el amplificador primario..... | 86 |
| 4.3.2.3.- Suministrando potencia a los amplificadores secundarios en serie al amplificador primario..... | 95 |
| V. ESTUDIO PARA EL CASO DE LOS TÚNELES DEL CERRO DEL CARMEN. | |
| 5.1.- Características del cable radiante a utilizarse..... | 99 |
| 5.2.- Solución utilizando cable radiante..... | 102 |
| 5.3.- Diagrama de los túneles y recorrido del cable radiante..... | 103 |
| 5.4.- Factor de perfil para el cable radiante (RPF)..... | 112 |

| | |
|-------------------------------------|-----|
| 5.5.- Evaluación del costo..... | 113 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 114 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 117 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|-------------------|----|
| Figura 1.1 | 4 |
| Figura 1.2 | 9 |
| Figura 1.3 | 11 |
| Figura 2.1 | 20 |
| Figura 2.2 | 21 |
| Figura 2.3 | 28 |
| Figura 2.4 | 29 |
| Figura 2.5 | 29 |
| Figura 2.6 | 32 |
| Figura 2.7 | 39 |
| Figura 2.8 | 42 |
| Figura 2.9 | 43 |
| Figura 2.10 | 44 |
| Figura 2.11 | 45 |
| Figura 2.12 | 45 |
| Figura 2.13 | 47 |
| Figura 2.14 | 48 |
| Figura 3.1 | 51 |
| Figura 3.2 | 51 |
| Figura 3.3 | 52 |

| | |
|--------------------|----|
| Figura 3.4 | 52 |
| Figura 3.5 | 53 |
| Figura 3.6 | 55 |
| Figura 3.7 | 56 |
| Figura 3.8 | 57 |
| Figura 3.9 | 58 |
| Figura 3.10 | 62 |
| Figura 3.11 | 64 |
| Figura 3.12a | 67 |
| Figura 3.12b | 68 |
| Figura 3.13 | 69 |
| Figura 3.14 | 71 |
| Figura 4.1 | 76 |
| Figura 4.2 | 78 |
| Figura 4.3 | 80 |
| Figura 4.4 | 82 |
| Figura 4.5 | 83 |
| Figura 4.6 | 86 |
| Figura 4.7 | 87 |
| Figura 4.8 | 88 |
| Figura 4.9 | 91 |
| Figura 4.10 | 92 |
| Figura 4.11 | 93 |

| | |
|-------------------|-----|
| Figura 4.12 | 94 |
| Figura 5.1 | 101 |
| Figura 5.2 | 103 |
| Figura 5.3 | 105 |
| Figura 5.4 | 107 |
| Figura 5.5 | 108 |

I. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE LA COBERTURA DE RF CELULAR EN ESTRUCTURAS SÓLIDAS

1.1 PRESENTANDO EL PROBLEMA

Un sistema celular puede dar servicio en amplias regiones casi sin interrupción. Con esta habilidad surge el deseo de usarlo por todas partes, y por eso los usuarios exigen más en sus expectativas para la cobertura. Este cambio en expectativas compromete a los proveedores de servicio a observar seriamente la posibilidad de proporcionar extensiones de sus sistemas en aquellas áreas donde los sistemas convencionales no pueden penetrar: edificios y túneles.

Los sistemas de túneles requieren cobertura RF continua sobre corredores largos, estrechos. Los edificios requieren soluciones RF que no sólo proporcionen cobertura continua sino que lo hagan de manera que no afecte la apariencia del edificio. Los sistemas de cables coaxiales radiantes pueden ofrecer soluciones de cobertura para ambas situaciones.

Los cables radiantes son cables coaxiales con hendiduras en el conductor exterior, por donde se deja escapar una cantidad controlada de energía

hacia el exterior del cable. Como las señales de RF viajan a través de la porción coaxial del cable, una porción es acoplada o irradiada desde el cable hacia el área de la cobertura. La cobertura de RF es continua a lo largo de la longitud del cable en comparación con una antena de fuente puntual, donde toda la energía se irradia desde un punto.

Los beneficios de usar cable radiante para la cobertura continua incluyen reducción en el potencial de bloqueo o sombra, reducción en los requerimientos de rango dinámico para los equipos transceptores, y mejoras potenciales en el ancho de banda instantánea de la señal RF. Además, la capacidad multi-banda de muchos de los cables radiantes proporciona la posibilidad de manejo de servicios múltiples de radio-frecuencia en un sistema.

1.2 EL BLOQUEO DE LA LÍNEA DE VISTA

En el diseño de la cobertura en el ambiente externo, estamos principalmente interesados en reunir los requerimientos de la cobertura en cuanto al nivel de la señal RF. Generalmente se ponen a punto las estaciones base y antenas para reunir el requerimiento de la cobertura y resolver problemas típicos producidos por el bloqueo. Cuando los sistemas se mueven dentro de edificios y túneles, el bloqueo de la señal RF entre los teléfonos celulares y las antenas de la estación base puede ser crítico debido a las estructuras y diversos obstáculos, incluyendo personas.

En un reciente estudio con un sistema de distribución con antena de fuente puntual, dentro de un edificio para determinar los requerimientos de cobertura celular en 800 MHz y 1900 MHz, se analizó como una concentración de personas puede afectar la cobertura. El estudio encontró

que cambios en la densidad de las personas causaron variaciones en el nivel de la señal tan altas como 30 dB. Estas variaciones eran tan significativas como para forzar handover en los teléfonos de usuarios celulares estacionarios a las células adyacentes.

Aunque las concentraciones de personas y otros cambios dinámicos también influirán en el patrón de radiación de un cable radiante, los sistemas pueden ser implementados para acomodar estos cambios asegurando que los usuarios permanezcan cerca del cable y reduciendo la dependencia en las reflexiones de la señal para la cobertura.

1.3 RANGO DINÁMICO EN UN SISTEMA CON CABLE RADIANTE

EL rango dinámico de un sistema o dispositivo activo (tal como un amplificador) es el cociente expresado en decibelios de la máxima potencia de la señal que el dispositivo activo puede manejar sin distorsión dividido por la potencia mínima detectable por encima del ruido interno.

Los dos parámetros de cable radiante que definen su performance en un sistema son la pérdida por inserción o longitudinal y la pérdida por acoplamiento (Ver figura 1.1 de la página 4). Como con cualquier cable coaxial, la pérdida de inserción es una medida de las pérdidas de RF como señales de RF que viajan dentro del cable.

La pérdida por acoplamiento es una medida de la fuga de la señal desde el cable, normalmente descrito en términos de la pérdida mediana a una distancia fija paralela al cable. Puesto que la pérdida por acoplamiento es constante a lo largo de la longitud del cable, las variaciones señal RF en el

área de la cobertura principalmente dependen de la pérdida de inserción y la distancia entre la unidad móvil y el cable.

Al usar antenas de fuente puntual para la cobertura en ambientes internos, las características técnicas para directividad y ganancia son de poco beneficio puesto que estructuras en la proximidad puede distorsionar la acción del patrón de la antena. Además, el espacio entre las antenas y usuarios pueden variar significativamente, lo cual puede crear variaciones amplias en el nivel de la señal.

Reducir el rango dinámico de la señal resultaría en costos de equipo más bajos y en amplificadores RF de menor potencia y circuitos de AGC menos sofisticados en el diseño del sistema.

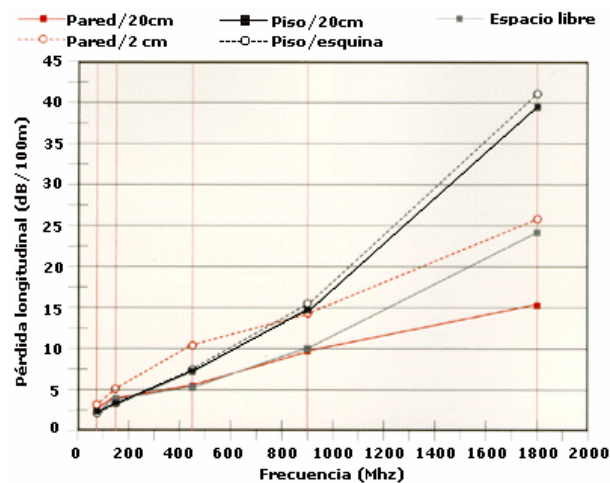


Figura 1.1.- Pérdida longitudinal del cable radiante.¹

Para los sistemas en edificio típicos, los cables radiantes pueden minimizar el rango dinámico lo cual puede proporcionar integridad en la señal y permitir esquemas de reuso de frecuencias en diseños sector-a-sector y

¹ La figura 1.1 fue obtenida en <http://www.rfs.de>

piso-a-piso. Las antenas de fuente puntual son convenientes para la cobertura en espacios grandes y abiertos con mayores distancias a los usuarios.

1.4 ANCHO DE BANDA DE LA SEÑAL RF

El ancho de banda GSM operativo de 200 kHz es aproximadamente 10 veces más ancho que el de sistemas celulares de banda angosta (analógico o digital) con portadoras de RF espaciados a 25 kHz o menos. El CDMA con ancho de banda de 1.25 MHz es significativamente más grande. Con el ancho de bandas incrementado, se debe observar no solamente el performance en amplitud del enlace de RF sino también el ancho de banda coherente de los dispositivos radiantes en el ambiente en el que ellos se instalan.

El ancho de banda coherente se refiere a la cantidad de transferencia de energía útil que puede ser soportada mientras se mantiene la distorsión de la señal dentro de límites específicos. En condiciones de propagación de espacio libre, el ancho de banda coherente es definido por el ancho de banda operativo del dispositivo radiante. Con sistemas en edificios o túneles, el ancho de banda coherente puede ser significativamente dependiente del ambiente en el que el dispositivo radiante se instala, y otros obstáculos reflexivos dentro del ambiente cambiarán el performance global del dispositivo radiante. Por ejemplo, dos antenas de dipolo de media-onda instaladas en un espacio estrechamente limitado pueden producir un ancho de banda coherente de sólo unos pocos Khz. Así, los sistemas de FM podrían operar en este ambiente, y es probable que GSM, CDMA, o sistemas del ancho de banda coherentes más anchos no podrían hacerlo.

Se debe considerar la degradación potencial del ancho de banda coherente en su diseño. Una serie de cables radiantes en modo acoplado y modo radiante se han instalado y probado en sistemas GSM, CDMA (IS-95), y sistemas del ancho de banda coherentes superiores dentro de túneles y edificios. Estas pruebas han mostrado que estos cables pueden soportar sistemas de RF con ancho de bandas coherente superiores a 1.25 MHz en muchos ambientes complejos.

Los sistemas del túnel están limitados en la cantidad de espacio disponible para montar cables y equipos. Los propietarios de edificios normalmente no pueden permitirse el lujo de instalar sistemas múltiples de RF. Además los proveedores de sistemas celulares han denegado el acceso a túneles y edificios puesto que no hay beneficio percibido por sus servicios a los propietarios de túneles y edificio.

Un sistema de servicio múltiple es una solución que supera estos problemas. Los proveedores celulares pueden ofrecer al propietario del túnel o edificio como solución un sistema que pueda incorporar servicios adicionales, como seguridad y mantenimiento, al costo adicional mínimo. Como ejemplo tenemos el sistema de cable radiante de Prado-Carenage in Marseille, Francia.

Este sistema proporciona GSM celular, seguridad en UHF, y cobertura de radio FM sobre un solo sistema de cable radiante. Los sistemas de cobertura RF para el nuevo Aeropuerto Internacional de Denver y la Metro Transit Rail Corporation en Hong Kong usa la misma filosofía. Ambos sistemas requirieron cobertura principalmente para un solo servicio que se expandió a un requerimiento de servicio múltiple a través de una solución eficiente en costo basada en cable radiante. El Aeropuerto Internacional de Denver provee 450 MHz/500 MHz para mantenimiento y seguridad y 800

MHz para la radio celular. El proyecto de Hong Kong proporciona 900 MHz GSM, AMPS celular, VHF paging, y servicios UHF para paging y seguridad.

1.5 BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS QUE UTILIZAN CABLE RADIANTE

El análisis de ganancias y pérdidas del enlace provee un método para determinar cobertura RF en diseño de sistemas de cable radiante. Las características técnicas primarias requeridas son las especificaciones de pérdidas por inserción y pérdidas por acoplamiento.

Se proporcionan las figuras de pérdida por inserción y pérdida por acoplamiento de las hojas de la especificación de fabricantes. La variación de pérdida por acoplamiento es un cálculo en el espacio libre de la pérdida adicional debido al incremento en la distancia a partir de la distancia de pérdida por acoplamiento especificada para el cable radiante (ejemplo 6 metros). Las figuras de pérdida para las paredes penetrantes son cálculos basados en estudios empíricos para las pérdidas a través construcción de paredes estándar. Se agregan márgenes a los valores de las pérdidas por acoplamiento para alcanzar requerimientos de probabilidad de cobertura más altos. Los valores para varias probabilidades de la cobertura (ejemplo 90%, 95%, 98%) generalmente son proporcionados por el fabricante del cable y son típicamente basados en datos de rango empírico. Muchos fabricantes especifican márgenes de cobertura más bajos para los cables de modo radiante o cables sintonizados en comparación con los cables de modo-acoplado.

Aunque los márgenes más bajos se mantienen verdaderos en condiciones de espacio libre, la distancia entre estos márgenes disminuye rápidamente

cuando se instalan cables de modo radiante en lugares donde los objetos reflexivos están cercanos al cable.

Usando variaciones estadísticas especificadas para el performance de todos los componentes del enlace se puede proporcionar un refinamiento mayor en los cálculos. Si es práctico, la obtención del performance real del cable radiante en el ambiente del sistema proporcionaría información más exacta. Instalando una sección del ensayo del sistema de cable radiante y realizando pruebas de performance RF preliminares puede proporcionar valiosos datos de la performance que no podrían estar prontamente disponible durante la fase de diseño (ejemplo: ancho de banda coherente, obstrucciones desconocidas, las pérdidas más alto de lo esperado a través de las paredes). El costo adicional para ejecutar pruebas es justificable si estas pruebas reducen o eliminan costos asociados con diseños conservativos o elimina costos de modificaciones de diseño del sitio.

1.5.1. Agregando amplificadores para extender el sistema

Cuando el cable llega a ser demasiado largo o tiene muchos dispositivos que agreguen pérdida, tal como divisores o los acopladores, la señal del RF puede requerir de los amplificadores para mejorar la cobertura de RF. Los amplificadores de conexión en cascada son una solución aceptable si la figura Portadora/Intermodulación (C/I) del enlace de bajada y la figura del ruido del sistema (SNF) del enlace de subida siguen dentro de límites aceptables. La figura del ruido del sistema SNF describe el decaimiento o degradación del nivel señal versus ruido cuando la señal pasa a través del sistema y está definida en decibelios como $10 \cdot \log((S_i/N_i)/(S_o/N_o))$, donde S_i = potencia de la señal de entrada, N_i = potencia del ruido de entrada, S_o = potencia de la señal de salida, N_o = potencia del ruido de salida.

Un cálculo simple para determinar el peor caso de C/I y SNF puede reducir al mínimo el tiempo de diseño.

En el enlace de bajada, se requieren suficientes niveles de energía de portadora para superar pérdidas de trayectoria. Con los sistemas de portadoras múltiples, los dispositivos no lineales tales como amplificadores generarán intermodulación. La meta en el diseño del sistema es reducir al mínimo los niveles de la intermodulación o bien maximizar el nivel C/I (Portadora/Intermodulación). Los parámetros siguientes: 3er orden de interceptación (IP_3) del amplificador, el punto de compresión de 1 dB del amplificador (CP_1), el número de los portadoras RF en el sistema, el nivel deseado de Portadora-Intermodulación (C/I), y el nivel deseado de Portadora-a-Ruido (C/N) son requisitos fundamentales en la determinación de la funcionalidad del sistema. Los parámetros IP_3 y CP_1 sirven para caracterizar la distorsión producida por un circuito.

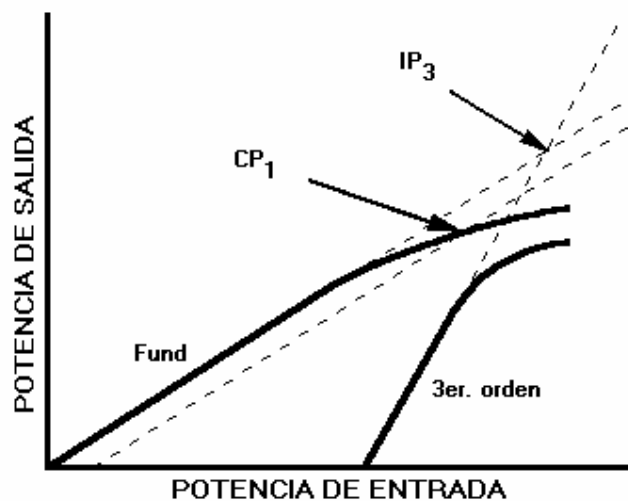


Figura 1.2.- Definición de CP_1 e IP_3 .

CP_1 es el punto donde la potencia de salida de la fundamental cruza la línea que representa la potencia de salida extrapolada desde las condiciones de señal pequeña menos 1 dB. IP_3 es el punto donde el término de 3er. Orden cuando es extrapolado desde las condiciones de señal pequeña cruza la potencia extrapolada de la fundamental.

El peor caso de la condición C/I ocurre en el centro de la banda de portadoras igualmente espaciadas y con igual potencia. Usando las cartas desarrolladas de las ecuaciones que definen el peor caso, la condición de centro de banda, se puede determinar fácilmente los requerimientos para los amplificadores. Por ejemplo, las cartas demuestran cómo un sistema que requiere ocho portadores, un cociente de C/I de 20dB , y utiliza un amplificador con un IP_3 especificado de 40dBm puede soportar una potencia máxima por portadora de 21dBm. Mientras que se conecten en cascada amplificadores adicionales, la potencia por portadora debe disminuir por un factor de $10^{\log_{10}}$ para mantener el mismo cociente de C/I.

Además, se debe confirmar que la potencia compuesta de RF no exceda el rango lineal del amplificador. Típicamente, una energía compuesta que está al menos 5dB por debajo del punto de compresión de 1dB del amplificador asegurará que la linealidad esté mantenida. Por ejemplo, con tres amplificadores en cascada, la potencia neta por portadora calculada arriba se reduce a partir 21dBm a 16,2 dBm por portadora. La energía compuesta de RF para las ocho portadoras de 16.2 dBm es 25,3 dBm. Los amplificadores en este sistema entonces requerirían un punto de compresión de 1dB superior a 30dBm (1 watt) para el funcionamiento apropiado del sistema.

1.5.2. Figura de ruido del Sistema

Los teléfonos portátiles de bajo nivel de potencia transmiten en el enlace de subida señales de radiofrecuencia que se acoplan en el sistema de cable radiante. Debido a la pérdida de acoplamiento y otros factores la señal puede llegar a niveles extremadamente bajos de potencia. Es posible que el ruido generado por los amplificadores u otros dispositivos activos del sistema puede alcanzar un nivel de potencia capaz de interferir con las señales de nivel bajo de RF. La meta en el diseño de todo sistema de radiofrecuencia es reducir al mínimo el ruido generado por los amplificadores y otros elementos activos mientras se maximiza la potencia de la señal del enlace de subida para mantener los cocientes de C/N requeridos para el funcionamiento apropiado del sistema. Un simple cálculo puede dar una aproximación de la figura de ruido del sistema (SNF). Un sistema típico de amplificadores en cascada requiere que las pérdidas de todas las secciones igualen a las ganancias de amplificación (es decir, la pérdida neta del sistema es 0 dB).

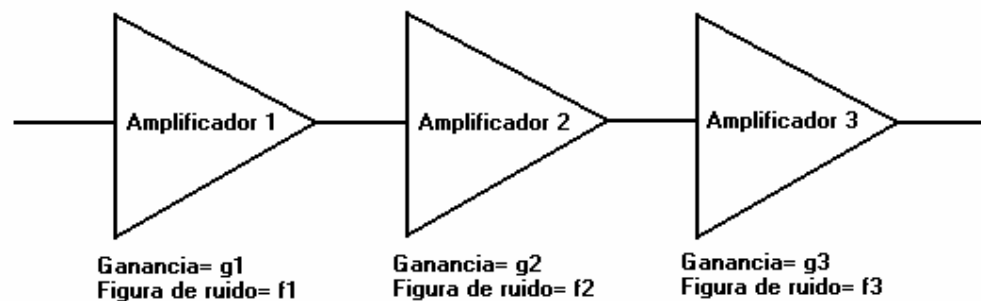


Figura 1.3.- Sistema de amplificadores conectados en cascada.

Con esta configuración de amplificadores se tiene la siguiente ecuación para calcular la figura de ruido del sistema:

$$\text{SNF(dB)} = 10\text{Log}[f_1 + (f_2-1)/g_1 + (f_3-1)/g_1g_2\dots(f_n-1)/g_1g_2\dots g_n].$$

Asumiendo que tienen iguales figuras de ruido la ecuación puede aproximarse mediante $\text{SNF(dB)} = 10\text{Log} [nfn]$, donde n = número de amplificadores en cascada y f_n = figura de ruido del amplificador.

En un sistema con 0 dB de pérdidas que contiene tres amplificadores conectados en cascada cada uno con una figura de ruido en el enlace de subida de 12dB, el SNF es aproximadamente 17dB. Tomando como referencia el ruido térmico cuya potencia está dada por la fórmula $P = kTB$, donde $k=1.38 \cdot 10^{-23}$, la constante de Boltzman, T = Temperatura en grados Kelvin, B = Ancho de banda en Hz, con un ruido de ancho de banda de 200 kHz, la potencia del ruido sería $8.2248 \cdot 10^{-16}$, lo cual equivale a -120 dBm. Entonces la potencia del ruido vista por el receptor se calcula como $-120 \text{ dBm} + 17 \text{ dB} = -103 \text{ dBm}$.

El requisito típico de la sensibilidad de un receptor puede no asegurar que el sistema funcione según lo deseado. Se debe verificar que el nivel de la señal del enlace de subida esté por encima del nivel de la energía de ruido multiplicado por el cociente requerido de C/N a través del sistema.

1.5.3. Minimizando la Intermodulación y la Figura del Ruido

Debemos reducir al mínimo el efecto de intermodulación y la figura del ruido. La calidad del cable y los conectores son los puntos de partida básicos para que los sistemas se realicen adecuadamente. Una vez que el sistema esté instalado y operacional, el acceso a los cables y a los

conectores puede llegar a ser extremadamente difícil. Los conectores y los cables de calidad inferior generarán intermodulación producto de la no linealidad creada por la calidad pobre del material. Los conectores con baja capacidad de reacción al estiramiento pueden causar problemas adicionales cuando se los somete a tensiones mecánicas o térmicas. Los amplificadores bi-direccionales con bajas figuras de ruido, altos CP_1 e IP_3 proporcionan funcionamiento excelente del sistema. Los amplificadores de corrección de errores o retroalimentadores pueden mejorar el funcionamiento de la intermodulación proporcionando puntos extremadamente altos de la interceptación. Se deben balancear coste contra funcionamiento puesto que los costes del amplificador pueden aumentar perceptiblemente cuando los niveles de CP_1 e IP_3 aumentan. Las pérdidas del enlace se reducen utilizando un cable radiante con rendimiento más grande o reduciendo la distancia entre los amplificadores, lo cual reducirá la intermodulación puesto que los amplificadores se pueden manejar a baja potencia y pueden proporcionar la misma cobertura. Por cada decibelio que caiga en la potencia de salida de la portadora, los productos de intermodulación de 3er orden caen por 2 dB.

1.6 CONSIDERACIONES PRELIMINARES DE DISEÑO DE SISTEMAS DE TÚNELES

Los túneles que pueden requerir cobertura pueden ser de varios tipos, túneles peatonales, para automóviles, ferroviarios, y los metros. El tipo de diseño que proporcione la mejor solución puede depender de varios factores:

- El número de los servicios requeridos: según lo indicado previamente, el ofrecimiento de servicios múltiples puede reducir los costes de agregar sistemas individuales.
- Sistemas de energía de DC/AC para los trenes. Con la alta potencia y corriente requerida para muchos trenes viene la posibilidad de corrientes inducidas en el sistema de radiación del cable. Los bloques DC, el poner a tierra, y los supresores de pico se convierten en componentes importantes en el diseño completo.
- Localización del cable radiante. Una correcta ubicación permite asegurar la separación con otros equipos y reducir al mínimo el efecto de sombra y obstrucción.
- Localización de amplificadores. Muchos túneles tienen localizaciones específicas en donde el equipo puede ser montado debido a las consideraciones disponibles del espacio y del mantenimiento. En caso de necesidad, se debe iniciar el diseño basado en las distancias fijas a las ubicaciones del equipo. Los sistemas de fuera del aire dependen de acceso directo a una estación base para el funcionamiento óptimo.
- Localización del equipo de la estación base. Para las estaciones bases en el sitio del túnel, la situación ideal es instalar el equipo en la mitad pues ésta permite cubrir distancias más cortas dentro del túnel. Las limitaciones prácticas requieren generalmente que el equipo puede estar situado en un extremo o en el otro.
- Handover. El traslape de la cobertura se debe proporcionar para asegurar el handover que ocurre entre la célula del túnel y la macrocelda. La velocidad de tráfico determinará la distancia a la que la celda al aire libre debe penetrar el túnel (por ejemplo a través de implementaciones fuera del aire),

así como la distancia en la que el sistema que está dentro del túnel debe extenderse más allá del extremo del túnel (a través de la antena o de una cobertura extendida del cable radiante).

1.6.1. Requerimientos Estructurales Necesarios para el equipamiento

Mientras que los trenes de alta velocidad llegan a ser más frecuentes, los sujetadores del cable radiante y otros sistemas de soporte deben permitir las altas fuerzas de operación.

- Disponibilidad de los cables de fibra óptica. El cableado óptico se puede utilizar para proporcionar longitudes largas de alimentación de RF, permitiendo para la posición remota del equipo de la estación base. La fibra se puede utilizar eficazmente en los sistemas fuera de aire eliminando la saturación de las celdas. La fibra se puede también utilizar en los sistemas de túneles eliminando la necesidad de conectar elementos RF en cascada a lo largo del sistema de cable radiante. Los sistemas alimentados por fibra permiten cobertura continua sin la degradación causada por la conexión en cascada en RF.
- Redundancia: muchos sistemas requieren de redundancia para asegurar cobertura especialmente en situaciones de crisis. La redundancia se puede proporcionar a través del equipo o sistemas de respaldo.
- Gradiente de fuego. Los requisitos para resolver ciertos grados para la inflamabilidad y la toxicidad del humo del cable de radiación pueden variar por la localización. La verificación de los estándares apropiados a ser reunidos debe realizarse antes de que se inicie el diseño.

1.7 CONSIDERACIONES PRELIMINARES DE DISEÑO DE SISTEMAS DE EDIFICIOS

Los sistemas para las comunicaciones en edificios varían puesto que no hay dos edificios semejantes. Las consideraciones del diseño incluyen muchos factores del sistema del túnel, tales como servicios múltiples, ubicaciones del equipo, acceso a la línea-de-sitio para los sistemas fuera del aire, handover, y gradiente de fuego. Los factores adicionales que son importantes incluyen:

1.7.1. Manteniendo la apariencia

Por lo general los dueños o arquitectos de edificios exigen que las antenas y los cables no sean visibles pues "degradan" el aspecto del edificio. El ubicar cables radiantes sobre techos falsos o en vestíbulos del servicio son soluciones posibles. Seleccionando correctamente el color del recubrimiento, el cable radiante combinará con el fondo cuando deben montarse en áreas externas.

En cuanto al servicio y mantenimiento, muchas de horas de mantenimiento pueden ser costosas. Sistemas pasivos o con una cantidad mínima de dispositivos activos reducen grandemente el mantenimiento general del sistema. Combinar equipos transceptores puede reducir el número de lugares que el personal de mantenimiento tiene que alcanzar.

1.7.2. Instalaciones dificultosas

La instalación de los cables en edificios puede requerir las múltiples rutas, como curvas, y las penetraciones en la pared. Los carretes del cable deben ser bastante pequeños para permitir el acceso en el edificio. Los tamaños pequeños del cable (el 1/2" hasta los máximos del 7/8") se utilizan típicamente en estas situaciones. Los cables deben ser de una construcción rugosa para acomodar los requisitos de la instalación. En la cobertura de pisos múltiples, dependiendo de la construcción del edificio, las pérdidas de la penetración a través de pisos en 900 Mhz pueden ser tan bajas como 5 dB para las losas de concreto y tan altas como 30 dB para las estructuras de concreto reforzadas. Debe analizarse la construcción del edificio y las pérdidas potenciales a través de las paredes y de los pisos.

La cobertura del edificio y del túnel es el paso final para completar redes de cobertura celular. El cable coaxial radiante es un elemento eficaz entre los componentes para proporcionar estas soluciones de la cobertura de RF. Con herramientas de diseño simples, se puede obtener una comprensión mejor de cómo irradia el cable, de cómo funcionan los sistemas. Con un conocimiento de todos los factores que pueden afectar el diseño del sistema, se puede diseñar un sistema de túnel complejo combinando eficientemente coste y eficacia.

II. TÉCNICAS UTILIZADAS PARA LA COBERTURA EN TÚNELES Y EDIFICIOS

2.2 EL CABLE COAXIAL CON ABERTURAS PERIÓDICAMENTE ESPACIADAS

2.1.1. Introducción

Los cables coaxiales cuyo conductor externo es ranurado o perforado puede ser utilizado como antena de estación base en un sistema inalámbrico para cobertura en interiores. Vamos a describir el uso de la técnica ray-tracing para predecir la cobertura de radio conseguida por el cable coaxial en un edificio con una geometría determinada. Con la técnica ray-tracing se modela el entorno electromagnético entre el transmisor y el receptor como un conjunto de señales que llegan al receptor con posibles cambios en dirección y amplitud causada por objetos en el área. Las señales múltiples son modeladas como “rayos” emitidos por el transmisor, reflejados por paneles, sujetos a atenuación, difracción y dispersión. Para cualquiera de los dos tipos de cable, de modo radiante o modo acoplado, el modelo que representa el cable es una secuencia de elementos bulbo-fluorescentes, cada uno de los cuales radia difusamente con un patrón de radiación que obedece la ley de Lambert, esta ley establece que la

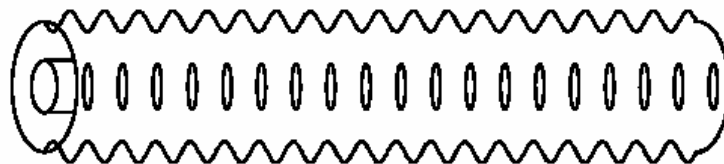
densidad de flujo de radiación emitida en cualquier dirección desde una superficie radiante varía como el coseno del ángulo formado por la normal a la superficie y la dirección de la radiación. Sin embargo los parámetros de pérdidas por acoplamiento los cuales definen el poder efectivo radiado por cada elemento, dependen significativamente del ambiente donde está colocado el cable, el cual puede ser altamente dispersivo (presencia de objetos más pequeños que la longitud de onda) o bien un ambiente despejado.

Los cables coaxiales ranurados han sido utilizados por muchos años como alimentadores inalámbricos en minas de carbón y túneles vehiculares. Recientemente, estos cables se emplean como una antena de estación base para sistemas inalámbricos en interiores.

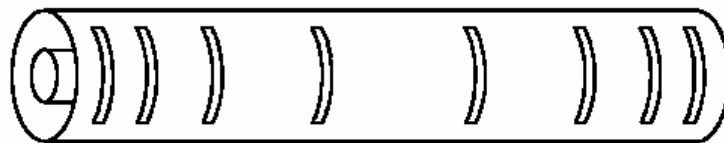
Las dos clases principales de cable coaxial ranurado son mostradas esquemáticamente en la figura 2.1 de página 20. Los cables tienen aislamiento entre los conductores interno y externo además tienen un recubrimiento periférico aislante. Los cables más antiguos, de modo acoplado tienen ranuras cercanamente espaciadas realizadas sobre el conductor externo corrugado. Los cables más recientes de modo radiante típicamente tienen un conductor externo flexible con ranuras espaciadas no uniformemente arregladas en un patrón periódico.

El cable en el modo acoplado es una estructura de onda cercana. En el espacio libre sus campos externos están cerradamente confinados al cable y así el cable no irradia excepto por efectos menores. La radiación depende de la dispersión de los campos locales producidos por los objetos cercanos en ubicación aleatoria. El acoplamiento efectivo a los receptores distantes es imposible de computar a-priori, así que deben ser determinados empíricamente. El cable en modo radiante con ranuras en un patrón periódico no uniforme puede irradiar en espacio libre. Sin embargo este

cable también tiene campos locales fuertes, y es probable que en muchos ambientes donde el cable en modo acoplado radia efectivamente por dispersión aleatoria, sea éste también el principal mecanismo por el cual el cable de modo radiante trabaja.



2.1(a) Cable de modo acoplado



2.1(b) Cable de modo radiante

Figura 2.1. Cables coaxiales ranurados.¹

No es promisorio buscar un modelo detallado para la dispersión desde los campos de fuga del cable, debido a que los ambientes son variados. En lugar de eso se debe asumir heurísticamente que cada elemento de la superficie del cable irradia difusamente como un bulbo de luz fluorescente. En la práctica se modela al cable como un número moderado de segmentos discretos. Cada segmento es aproximado por una fuente puntual que irradia incoherentemente con un patrón que obedece a la ley de Lambert.

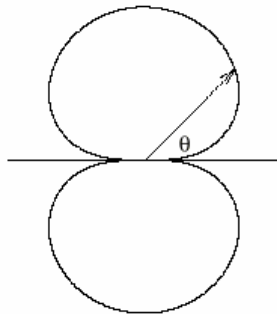
La potencia irradiada desde cada segmento es determinada por la pérdida de acoplamiento estándar, la cual está definida como el cociente en

¹ Las figuras 2.1-2.6 fueron obtenidas en <http://www.bell-labs.com>

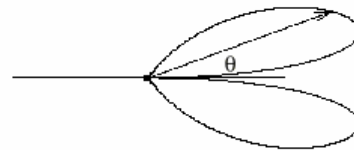
decibelios de la potencia portada por el cable para la potencia media recibida , por un dipolo de media onda a una distancia estándar desde un cable largo.

El valor nominal de la pérdida de acoplamiento estándar esta dado por el fabricante. Sin embargo la pérdida de acoplamiento parece depender fuertemente de los alrededores inmediatos al cable, así debe determinarse mediante mediciones cercanas al cable en un ambiente particular.

El modelo de bulbo-fluorescente intenta predecir el nivel de potencia media sobre una región cuyas dimensiones son comparables a una longitud de onda. Se espera que las fluctuaciones locales en la amplitud del campo tengan la distribución de Rayleigh, esto debería resultar de la dispersión de los campos de fuga del cable por inhomogeneidades localizadas aleatoriamente a lo largo del cable.



2.2(a) Patrón de elemento difuso (Ley de Lambert)



2.2(b) Patrón de elemento determinístico (900 Mhz)

Figura 2.2.- Patrones de Radiación Difuso y Determinístico.¹

¹ Las figuras 2.1-2.6 fueron obtenidas en <http://www.bell-labs.com>

Para el cable en modo radiante se ha tratado un solo modelo, el cual toma en cuenta la disposición periódica de las ranuras. El cable se representa como una secuencia de fuentes puntuales coherentes con espaciamiento igual al periodo de la secuencia de las ranuras (un poco más grande que un metro en nuestro ejemplo). Cada fuente tiene un patrón de radiación de campo lejano equivalente al patrón de un simple periodo de la secuencia de las ranuras, tratado como un arreglo lineal espaciado no uniformemente excitado por la onda que viaja en el cable. En la ausencia de dispersión producida por objetos cercanos aleatorios, este modelo determinístico debería predecir los campos del cable ranurado a distancias más grandes que unos pocos metros medidos desde el cable. Sin embargo el modelo difuso de los bulbos fluorescentes parece concordar mejor con las medidas sobre el cable en modo radiante que el modelo determinístico. El modelo determinístico trabajaría mejor en aquellos casos, si los hay, donde esencialmente no hay objetos dispersivos cercanos al cable y donde un cable en modo acoplado irradiaría pobremente.

En las secciones siguientes describiremos los modelos difuso y determinístico con más detalle. Posteriormente evaluaremos mediciones con cable en modo acoplado y en modo radiante en un edificio de oficinas a 900 Mhz y con cable en modo acoplado en una bodega a 1.9 Ghz, y compara los datos experimentales con las predicciones.

2.1.2. El Modelo Difuso

En este modelo se asume que el cable irradia difusamente de acuerdo a la ley de Lambert a través de una superficie cilíndrica de algún radio mas largo que el radio físico del cable pero más pequeño comparado con la distancia al receptor.

La potencia media que fluye por un ángulo sólido unitario en una dirección dada proveniente de un elemento de superficie que irradia difusamente es proporcional al $\cos \gamma$ donde γ es el ángulo de emisión con respecto a la normal. De esto se sigue que el flujo de potencia por unidad de ángulo sólido desde un elemento de cable fino es proporcional al $\sin \theta$ donde θ es el ángulo entre la dirección de vista y el eje del cable. El campo eléctrico equivalente generado a una distancia r por un elemento de cable fino es proporcional a:

$$E = S(\theta)/r, \quad S(\theta) = \sqrt{\sin \theta}. \quad (1)$$

$S(\theta)$ está graficada en la figura 2.2(a) de la página 21.

Definamos P_{dipolo} como la potencia recibida por un dipolo de media onda paralelo y a una distancia D desde el eje de un radiador difuso largo con atenuación despreciable. Definamos Π como la potencia irradiada por unidad de longitud en la polarización a la cual el dipolo responde (típicamente una fuente difusa irradia igual potencia en ambas polarizaciones). Un cálculo directo considerando los patrones de radiación del cable y del dipolo conduce a:

$$P_{\text{dipolo}} = (8 \Pi / \pi D) (\lambda / 4 \pi)^2, \quad (2)$$

Donde λ es la longitud de onda en espacio libre. Para dipolos en otras orientaciones, el coeficiente numérico difiere algo de $8/\pi$, pero las diferencias son menores que las incertidumbres dentro del modelo y pueden ser ignoradas.

La pérdida de acoplamiento estándar es definida por:

$$L = 10 \log_{10} (P_{\text{cable}} / P_{\text{dipolo}}), \quad (3)$$

Donde P_{cable} es la potencia irradiada por el cable, y D es convencionalmente 2 metros o 20 pies. Las ecuaciones (2) y (3) relacionan la potencia del cable, la pérdida de acoplamiento estándar, y la potencia irradiada efectiva por unidad de longitud.

2.1.3. Modelo Determinístico

En el modelo determinístico del cable en modo radiante se representa el cable como una línea de fuentes puntuales coherentes, cada una con un patrón de radiación de un periodo de la secuencia de las ranuras excitadas por una onda viajera. El patrón del campo de una fuente es:

$$E = S(\theta)/r, \quad S(\theta) = S_0(\theta) S_1(\theta). \quad (4)$$

Donde $S_0(\theta)$ es el patrón de una simple ranura y $S_1(\theta)$ es el factor de arreglo de un simple periodo de la secuencia de las ranuras.

Se espera que el patrón de ranura $S_0(\theta)$ tenga la misma dependencia espacial que el patrón de una ranura circunferencial completa sobre el cable coaxial con recubrimiento dieléctrico, puesto que los términos dependientes del ángulo en la solución completa contribuyen solamente a los campos de la vecindad inmediata a la ranura. El cálculo de la amplitud del término dominante desde la teoría podría ser laborioso pero puede ser determinado empíricamente si es necesario.

El factor de arreglo $S_1(\theta)$ se simplifica asumiendo que las ranuras están simétricamente colocadas, a $\pm z_n$, con respecto al punto medio del elemento de cable, y son todas ellas excitadas con iguales amplitudes.

En el presente caso hay 32 ranuras, así

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{16} \cos[(k \cos \theta - k_c) z_n] , \quad (5)$$

donde

$$k = 2\pi/\lambda, \quad k_c = 2\pi/\lambda_c , \quad (6)$$

Donde λ y λ_c son longitud de onda del espacio libre y la longitud de onda del cable respectivamente. En este caso el fabricante nos da $\lambda_c/\lambda = 0.88$, y los 16 valores de z_n están listados en la tabla 2.1. Para el cable radiante utilizado en las pruebas realizadas por Bell-Labs se determinaron los siguientes espaciamentos de las ranuras:

| n | z_n | n | z_n | n | z_n | n | z_n |
|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|
| 1 | 0.7 | 5 | 7. | 9 | 14.15 | 13 | 24.85 |
| 2 | 2.05 | 6 | 9.65 | 10 | 17.2 | 14 | 27.5 |
| 3 | 3.85 | 7 | 11.45 | 11 | 19.85 | 15 | 30.6 |
| 4 | 6.5 | 8 | 12.75 | 12 | 20.35 | 16 | 38.25 |

Tabla 2.1.- Coordenadas de las ranuras del cable (cm).¹

Un gráfico de $|S(\theta)|$ a 900Mhz incluyendo el patrón de ranura y el patrón del arreglo se muestra en la figura 2.2(b) de la página 21. El patrón de ranura tiene un nulo angosto a lo largo del eje del elemento, y el patrón del

¹ Las tablas 2.1-2.4 fueron obtenidas en <http://www.bell-labs.com>

arreglo tiene un lóbulo de terminación suavizado a esta frecuencia, en la dirección a la cual la onda esta viajando en el cable.

Finalmente un cable instalado puede incluir varias repeticiones de un patrón de ranura separadas por una distancia constante (en nuestro caso 106.8 cm). El campo distante al cable, si uno estuviera lo suficientemente lejos para verlo, debería tener un factor de arreglo correspondiente a uno uniformemente espaciado con una variación constante en la fase superpuesta sobre un patrón de un simple elemento. El campo de un arreglo uniforme largo puede ser completamente angosto si el espaciamiento es grande comparado con la longitud de onda.

2.1.4. Pruebas realizadas por Bell-Labs: Predicciones y Mediciones

2.1.4.1. En Edificios de Oficinas

Las mediciones de propagación realizadas por Bell-Labs fueron hechas a 900 Mhz en un edificio de oficinas con paredes y pisos de concreto. Una vista del segundo piso es mostrada en la figura 2.4 de la página 29. Se utilizaron ambos modos el radiante y el acoplado, y cada cable fue colocado sobre el techo falso del segundo piso, en una configuración este-oeste, norte-sur, este-oeste, como es indicado por la línea de puntos en la figura 2.4. El cable es alimentado desde su punto central con 7.4 dBm para cada lado. La longitud total del cable mostrado en la figura 2.4 es aproximadamente 110 mt.

El nivel de potencia recibido , para una entrada constante al cable coaxial fue medido por un equipo móvil y registrado por un sistema automático. La antena móvil es un monopolo de media onda alimentado por el extremo, el

radio es movido automáticamente en trayectoria circular para evitar desvanecimientos intermitentes de la señal. Los datos fueron tomados en por lo menos 3 visitas a cada una de las 75 localizaciones del segundo piso indicadas por pequeños círculos en la figura 2.4. En cada localización el equipo móvil era detenido y la potencia recibida era promediada sobre un periodo de al menos 25 seg.

La predicción usando la técnica ray-tracing es como sigue. El patrón de la antena receptora es asumido isotrópico, puesto que la potencia recibida fue promediada sobre muchas diferentes orientaciones. El cable coaxial fue modelado como una línea de fuentes espaciadas aproximadamente por un metro. Ambos patrones de radiación difuso y determinístico fueron usados para el cable en modo radiante, pero solamente el patrón difuso fue utilizado para el cable en modo acoplado. Un nivel de potencia arbitrario fue asumido para las dos fuentes adyacentes al punto de alimentación, y los valores dados por el fabricante fueron tomados para las constantes de atenuación y de fase. Después de que el cálculo mediante ray-tracing fue completado, todos los niveles de potencia fueron ajustados para que los niveles predichos de potencia media recibidos por cuatro localizaciones cercanas al punto de alimentación sean iguales a los niveles de potencia media medidos en esas localizaciones. Alternativamente el nivel de potencia radiado podría ser deducido directamente desde la potencia de entrada y la pérdida de acoplamiento estándar L si conocemos un valor confiable de este parámetro.

| | | Mean | Std |
|------------------------|----------------------|------|-----|
| Office bldg 900 MHz | Coupled | 0.9 | 5.2 |
| | Radiating diffuse | -1.3 | 4.9 |
| | Radiating determ. | 1.5 | 8.3 |
| Warehouse 1.9 Ghz | Coupled (cell A) | 1.5 | 8.4 |
| | Coupled (cell B) | -1.9 | 7.9 |

Tabla 2.2.- Desviación Media y Estándar del Error de Predicción (dBm).¹

Las figuras 2.4 y 2.5 (página 29) muestran los niveles de potencia predcidos dentro de los modelos difuso y determinístico del cable en modo radiante, usando la escala de color de la figura 2.3 (página 28). El modelo difuso predice una distribución más suavizada de la potencia que el modelo determinístico. En particular, el modelo determinístico predice una región de baja potencia cercana al punto de alimentación justo debajo del centro de la figura 2.5, debido a que los lóbulos del patrón de radiación apuntan lejos del punto de alimentación.

Puesto que la irregularidad del modelo determinístico no es aparente en los datos experimentales, se recomienda utilizar el modelo difuso para el cable en modo acoplado y modo radiante.

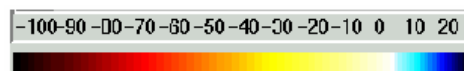


Figura 2.3.- Escala de color (dBm).²

¹ Las tablas 2.1-2.4 fueron obtenidas en <http://www.bell-labs.com>

² Las figuras 2.1-2.6 fueron obtenidas en <http://www.bell-labs.com>

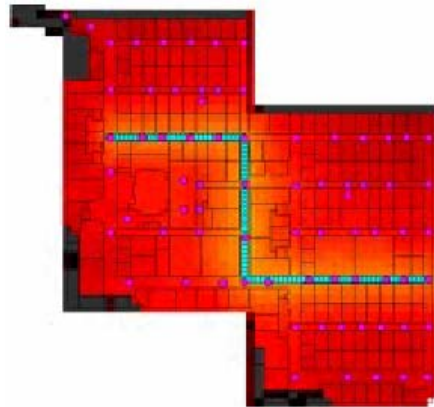


Figura 2.4.- Cobertura predecida del edificio de oficinas por el cable en modo radiante a 900 Mhz (modelo difuso).

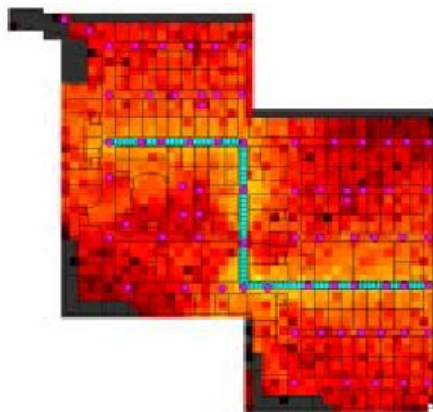


Figura 2.5.- Cobertura predecida del edificio de oficinas por el cable en modo radiante a 900 Mhz (modelo determinístico).¹

¹ Las figuras 2.1-2.6 fueron obtenidas en <http://www.bell-labs.com>

La sección superior de la tabla 2.2 (página 28) muestra la desviación media y estándar del error de predicción (dBm predicho - dBm medido) sobre las 75 localizaciones medidas sobre el segundo piso del edificio de oficinas. La irregularidad del modelo determinístico es reflejada en el alto valor de la desviación estándar del error de predicción.

| | | | Threshold (dBm) | | |
|------------------------|----------------------|------|-----------------|------|------|
| | | | -60 | -70 | -80 |
| Office bldg 900 MHz | Coupled | Meas | 0.30 | 0.63 | 0.88 |
| | | Pred | 0.22 | 0.76 | 0.96 |
| | Radiating diffuse | Meas | 0.39 | 0.81 | 1.00 |
| | | Pred | 0.24 | 0.84 | 1.00 |
| | Radiating determ. | Meas | 0.39 | 0.81 | 1.00 |
| | | Pred | 0.43 | 0.82 | 0.99 |
| Warehouse 1.9 GHz | Coupled (cell A) | Meas | 0.29 | 0.62 | 0.95 |
| | | Pred | 0.30 | 0.70 | 0.89 |
| | Coupled (cell B) | Meas | 0.30 | 0.73 | 0.99 |
| | | Pred | 0.28 | 0.61 | 0.86 |

Tabla 2.3.- Cobertura a diferentes umbrales. ¹

La tabla 2.3 muestra el porcentaje de cobertura de las 75 localizaciones a varios umbrales, de acuerdo a la predicción y a la medición. Experimentalmente, el cable en modo radiante da significativamente mayor cobertura que el cable en modo acoplado con la misma potencia de entrada.

Además de las mediciones reportadas aquí, mediciones de fuerza de campo fueron hechas en los otros pisos, mientras el cable estaba ubicado en el segundo piso. Los pisos de concreto introducían una atenuación adicional de 15 a 20 dB .

¹ Las tablas 2.1-2.4 fueron obtenidas en <http://www.bell-labs.com>

2.1.4.2. Predicciones y Mediciones en una Bodega

Bell-Labs realizó mediciones en una bodega con techo metálico corrugado a 23 pies sobre el piso.

La bodega fue llenada con varias filas de anaqueles con una altura de hasta 20 pies empacados con muchas clases de mercaderías utilizadas para construcción y jardinería. En el archivo del plano de las paredes, los anaqueles fueron modelados como rectángulos angostos encerrados por un tipo de pared especial diseñado para que aproxime las pérdidas estimadas debidas a los anaqueles.

La reflexividad y transmisividad de la pared fueron ajustadas para corresponder a la potencia recibida desde una antena de fuente puntual detrás de dos conjuntos de anaqueles. Este esfuerzo de modelado especial fue considerado razonable debido a que hay muchas bodegas con arreglos similares.

El objetivo es determinar la cobertura que se puede conseguir a 1.9 Ghz con un cable coaxial ranurado en modo acoplado (RADIAX RXP4-2) suspendido bajo el techo a través de vigas de acero espaciadas entre sí por varios pies. El receptor móvil tiene una pequeña antena patch. El receptor era movido oscilatoriamente por 12 segundos para evitar desvanecimientos intermitentes. Este procedimiento era repetido hasta 4 veces si las mediciones eran inestables. En el modelo el patrón de receptor fue asumido isotrópico.

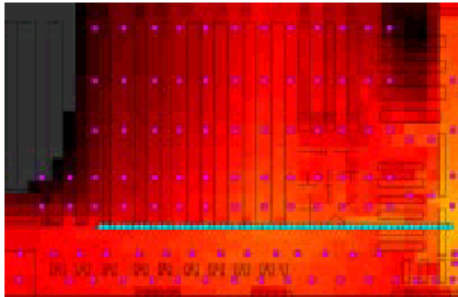


Figura 2.6.- Cobertura predecida de la bodega por el cable en modo acoplado a 1.9 Ghz. ¹

La figura 2.6 muestra los niveles de potencia predecidos para un cable coaxial de 200 pies en la celda A , donde celda A es definida por las 105 localizaciones del receptor mostradas.

El cable era alimentado en el centro con 16.3 dBm para cada lado. El modelo de radiación difuso asume una onda progresiva en cada lado del cable, con una constante de atenuación de 12.3dB/100pies estimadas por datos del fabricante. El nivel de potencia irradiado en el modelo ray-tracing está basado en igualar la potencia recibida promedio en dBm en 5 localizaciones cercanas al centro del cable con la potencia predecida en estos mismos sitios. El procedimiento es equivalente a asumir un valor particular para la pérdida de acoplamiento estándar.

En la instalación de la bodega el final izquierdo del cable tenía una terminación no radiante, mientras que el extremo derecho tenía una terminación radiante para incrementar la cobertura. La terminación irradiaría $16.3-12.3= 4.0$ dBm isotrópicamente aunque esto puede ser un sobre estimado de la potencia irradiada. La terminación no altera los

¹ Las figuras 2.1-2.6 fueron obtenidas en <http://www.bell-labs.com>

campos cercanos al centro del cable lo suficiente como para afectar el estimado de la pérdida de acoplamiento estándar.

La figura 2.6 (página 32) muestra solamente los resultados con la terminación radiante, sin estos, el campo predecido para el extremo derecho sería similar al campo predecido para el extremo izquierdo.

Un segundo conjunto de mediciones en 120 localizaciones experimentales fue hecho en otras partes de la bodega (celda B), también iluminada por un cable coaxial en modo acoplado de 200 pies. De nuevo la pérdida de acoplamiento efectivo fue determinada igualando la potencia promedio en cinco localizaciones cercanas al centro del cable. La parte inferior de la tabla 2.2 (página 28) muestra la desviación media y estándar del error predecido para las dos celdas de la bodega, y la parte inferior de la tabla 2.3 (página 30) muestra los porcentajes medidos y predecidos de las localizaciones cubiertas a varios umbrales.

Las concordancias del modelo ray-tracing con las mediciones en la bodega son menos buenas que la concordancia de las mediciones en las oficinas. Visualmente en la figura 2.4 (página 29) el radiador terminal aparece sobre iluminando el lado derecho del gráfico. La inclusión del radiador terminal en el modelo mejora la concordancia entre la cobertura predecida y la cobertura medida (tabla 2.3). Sin embargo, el radiador terminal no cambia la desviación estándar del error de predicción (tabla 2.2), aunque reduce el error de predicción promedio. El valor medio del error de predicción en la bodega es 1.5 a 2 dB con una desviación estándar de 8 dB, en comparación con el error medio de 1 a 1.5 dB y una desviación estándar de 5 dB del modelo difuso para el edificio de oficinas.

Un posible defecto del modelo es la asunción de que la potencia del cable cae exponencialmente en ambas direcciones así como uno se mueve

desde el punto de alimentación. Uno podría esperar que la potencia a lo largo de una línea mas o menos directamente bajo el cable cae similarmente con la distancia. Sin embargo las mediciones experimentales no muestran dicha caída en el lado izquierdo del cable el cual no tiene una terminación radiante. Si el cable es uniforme entonces podría sospecharse de una onda viajera amortiguada exponencialmente. Uno debería buscar un modelo mas sofisticado para las ondas dentro del cable aunque si un modelo predictivo necesita mucha sintonización a-posteriori para trabajar, sería de utilidad limitada.

2.1.4.3. Perdida de acoplamiento Estándar

En la práctica los cálculos con ray-tracing fueron hechos asumiendo un valor arbitrario para la potencia Π irradiada por unidad de longitud por los elementos de cable adyacentes al punto de alimentación, y entonces ajustando Π para igualar la potencia recibida promedio en algunos puntos medidos. De (2) y (3), la pérdida de acoplamiento estándar L correspondiente al valor ajustado de Π es

$$L = 10 \log_{10} [(\pi D / 8 \Pi) (4 \pi / \lambda)^2 P_{\text{cable}}], \quad (7)$$

donde D es la distancia en la cual la pérdida de acoplamiento estándar es definida, P_{cable} es la potencia del cable en el punto de alimentación.

La tabla 2.4 (página 35) muestra los valores equivalentes de la pérdida de acoplamiento estándar L que fueron usados para el cable en modo acoplado y para el cable en modo radiante (modelo difuso) en el edificio de oficinas, y para el cable en modo acoplado en la bodega. La distancia estándar D fue tomada como 20 pies para el cable en modo acoplado, y 2

metros para el cable en modo radiante. Los valores de L del fabricante a las frecuencias operantes son también dadas en la tabla.

| | | Vendor | Empirical |
|------------------------|----------------------|--------|-----------|
| Office bldg 900 MHz | Coupled | 66 | 55 |
| | Radiating diffuse | 63 | 49 |
| Warehouse 1.9 GHz | Coupled (cell A) | 62 | 68 |
| | Coupled (cell B) | 62 | 72 |

Tabla 2.4. Pérdida de acoplamiento estándar (dB).¹

La pérdida de acoplamiento estándar es mas baja (más potencia irradiada) que los valores del fabricante en el edificio de oficinas a un permitiendo la incertidumbre convencional de ± 10 dB en los valores dados por el fabricante. La pérdida de acoplamiento efectiva baja puede ser debida al hecho de que los cables estaban colocados sobre un techo falso, entre un gran número de estructuras metálicas que podrían dispersar los campos del cable. La pérdida de acoplamiento estándar para el cable coaxial en la bodega es más grande que el valor dado por el fabricante, aunque no estrictamente fuera del rango de 10dB. En la bodega el cable estaba colgado a través de vigas de acero en un espacio abierto grande debajo del techo, relativamente lejos de objetos dispersantes potenciales.

Se realizaron comparaciones entre las predicciones y las mediciones para cables en modo acoplado y radiante en un edificio de oficinas a 900 Mhz, y para cable en modo acoplado en una bodega a 1.9 Ghz. En el edificio de oficinas los dos cables fueron colocados en la misma posición sobre un techo falso. Experimentalmente el cable en modo radiante da mejor

¹ Las tablas 2.1-2.4 fueron obtenidas en <http://www.bell-labs.com>

cobertura que el cable en modo acoplado para la misma potencia de entrada. Usando un modelo difuso para ambos tipos de cable, el error de predicción media para ambos fue de 1 a 1.5 dB y la desviación estándar fue de 5 dB.

En la bodega, Bell obtuvo dos conjuntos de mediciones con cable en modo acoplado. El uso de una descripción particularizada del electromagnetismo de los anaqueles que son la principal característica del lugar, produjo un error de predicción promedio del modelo ray-tracing de 1.5 a 2 dB y una desviación estándar de 8 dB.

Un hallazgo significativo es que la pérdida de acoplamiento estándar, La cual se obtuvo igualando las predicciones del programa ray-tracing a las mediciones de unos pocos puntos cercanos al centro de cable, pueden diferir del valor medio dado por el fabricante por ± 10 dB. Potencia altamente dispersa, corresponde a pérdida de acoplamiento bajo, lo cual ocurre cuando el cable está en un ambiente altamente dispersante por ejemplo sobre un techo falso donde hay muchos objetos metálicos. Potencia con baja dispersión corresponde a pérdida de acoplamiento alta, lo cual ocurre en un ambiente dispersivamente despejado, por ejemplo cuando el cable está suspendido transversalmente sobre vigas de acero en un espacio abierto grande.

El rango de valores posibles de pérdida de acoplamiento es más grande de lo que uno desearía para propósitos predictivos. Por lo tanto para usar la herramienta ray-tracing efectivamente, uno necesita mas experiencia con cables coaxiales ranurados en diferentes ambientes para así elegir valores realísticos de pérdida de acoplamiento para un sitio dado, o aún más realizar algunas mediciones en el edificio con el cable, para de esta manera calcular la cobertura en el resto del edificio.

2.2 MICROCELDAS Y SISTEMAS DE ANTENAS MÚLTIPLES CON FIBRA

2.2.1. Características Generales

Un proyecto de radio sobre fibra puede tener un equipamiento tecnológicamente avanzado de bajo costo, diseñado para tratar con 2 tipos de situaciones que surgen en el desarrollo de una red telefónica celular.

1. Puntos Muertos: Esta clase de situación surge donde es imposible establecer comunicación debido a que la señal es débil o prácticamente no-existente. Ejemplos típicos son túneles de carreteras y túneles subterráneos.

2. Puntos Congestionados: Hay áreas que pueden fácilmente congestionarse con un gran número de usuarios convergiendo al mismo tiempo. Esto sucede típicamente en áreas de oficina, aeropuertos, etc. Para prevenirlo, las celdas de radio son divididas en microceldas y aún en pico celdas, así podemos obtener el mayor uso del espectro de frecuencia asignado. Esto significa un incremento en el número de canales de radio disponibles.

La solución normal es incrementar el número de estaciones base desplegadas de manera que cada microcelda , picocelda o punto muerto es servido por al menos una estación base, esto eleva considerablemente los costos de instalación debido al costo de las estaciones base.

El proyecto de radio sobre fibra viene a ser una solución muy efectiva en costo. Los repetidores de radio sobre fibra pueden llevar señales desde

una simple estación base a todos los puntos cuya cobertura necesita ser asegurada. El transporte de estas señales se realiza por fibras ópticas. El uso de fibra óptica como medio de transmisión tiene las importantes ventajas:

- **Baja atenuación:**
Con fibra óptica la atenuación es 0.7dB/km comparado con 0.4dB/mt para cable coaxial convencional es decir mil veces menos. Esto significa que las señales pueden ser transportadas sobre largas distancias sin repetidores intermedios, los cuales son necesarios con el cable coaxial y evidentemente aumentan los costos.
- **Impenetrabilidad a la Interferencia Electromagnética:**
La comunicación sobre fibra óptica utiliza luz emitida por un láser y por lo tanto no se ve afectada por la radiación electromagnética. Esto es ventajoso para el cableado de edificios porque los ductos existentes usados para cables telefónicos, cables coaxiales, líneas de suministro eléctrico pueden ser utilizados.
- **Gran Ancho de Banda:**
El ancho de banda (relacionado con la capacidad de transportar información) de una fibra es miles veces superior que el de un cable coaxial. La fibra da lugar a todos los estándares de telefonía móvil actualmente en uso (TMA-900, GSM, DCS-1800, CDMA, DECT, etc.) y aquellos que serán introducidos en el futuro cercano. Esto significa que este equipamiento es fácilmente adaptable a las bandas de transmisión requeridas por cualquier sistema particular.

2.2.2. Características Técnicas

La figura 2.7 nueve muestra un escenario típico para aplicación de un sistema de radio sobre fibra.

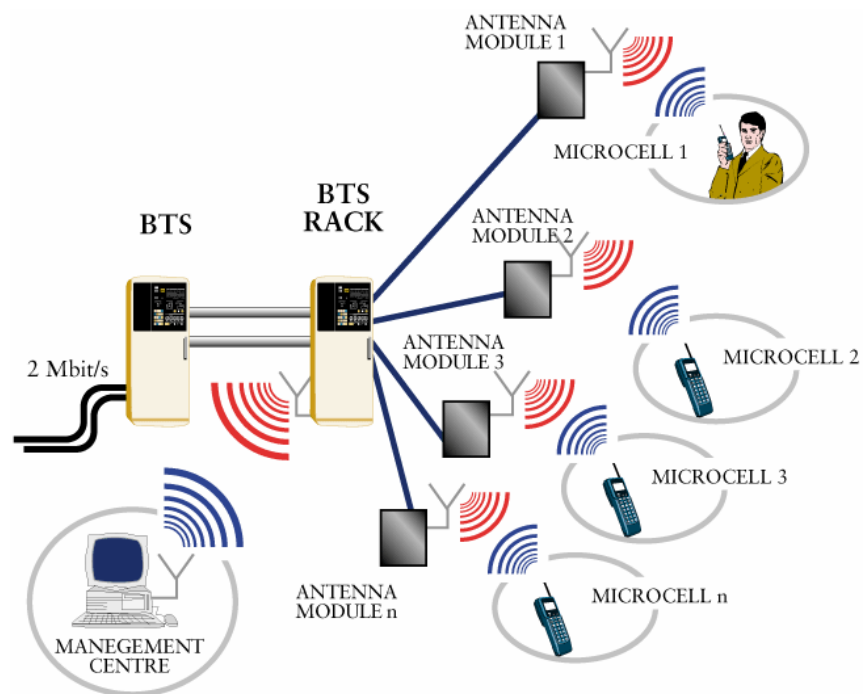


Figura 2.7. Escenario de aplicación de un Sistema de Radio sobre Fibra. ¹

En este escenario lo principal es proveer cobertura a un conjunto de N microceldas, usando solamente una estación transceptora base (BTS). Cada microcelda puede ser, por ejemplo un piso, en un edificio comercial, o uno de un conjunto de túneles de trenes.

El sistema de radio sobre fibra consiste en los siguientes 4 bloques principales.

¹ Las figuras 2.7-2.14 fueron obtenidas de la siguiente dirección de Internet: www.tid.es

- 1.- El BTS.
- 2.- Los cables de Fibra.
- 3.- Los módulos de antena.
- 4.- El centro de administración.

En el enlace de bajada la señal proveniente del BTS, la cual es una señal de radio, es convertida a frecuencia de luz en el BTS. Luego es propagada sobre el cable de fibra óptica hacia el módulo de antena, donde es convertida otra vez en señal de radio y diseminada por la antena acoplada al módulo.

En el enlace de subida la señal proveniente de la terminal móvil es recibida en el módulo de antena, donde es convertida a frecuencia de luz. La señal viaja por la fibra óptica hacia el BTS donde es convertida a radio frecuencia.

Con este sistema el BTS se encuentra en una localización central y las microceldas son alimentadas a través de los módulos de antena. Como veremos estas son pequeñas y extremadamente simples, lo que las hace fáciles de instalar.

Las características técnicas principales son:

- El sistema puede emitir sobre dos canales al mismo tiempo en la banda GSM, con salida de 1Watt por canal. Tal potencia es alta para el estándar de microceldas normales. Con dos canales GSM es posible servir a 15 usuarios simultáneamente lo cual es mas que suficiente para ambientes de microcelda o picoceldas.

- El sistema puede garantizar calidad aceptable para secciones de fibra óptica de no más de 5 Km y/o 5dB de atenuación. Debido al límite de distancia es posible utilizar componentes ópticos mucho menos costosos. En nuestro caso las secciones de fibra son raramente mas largas de unos pocos kilómetros.
- El equipamiento desarrollado teniendo en cuenta las dos principales características que hacen al sistema atractivo para el operador: simplicidad de instalación y bajo costo. Estas características se consiguen a través de aspectos tales como bajo consumo de voltaje, 220V y el tamaño pequeño de los módulos de las antenas. La simplicidad de instalación significa dos cosas: los costos de instalación deben ser bajos, la instalación debe ser rápida, esto es importante en un ambiente competitivo.
- Otra característica importante del sistema es la flexibilidad de adaptación a los diferentes estándares de telefonía móvil.

2.2.3. El BTS

La figura 2.8 muestra un diagrama del BTS.

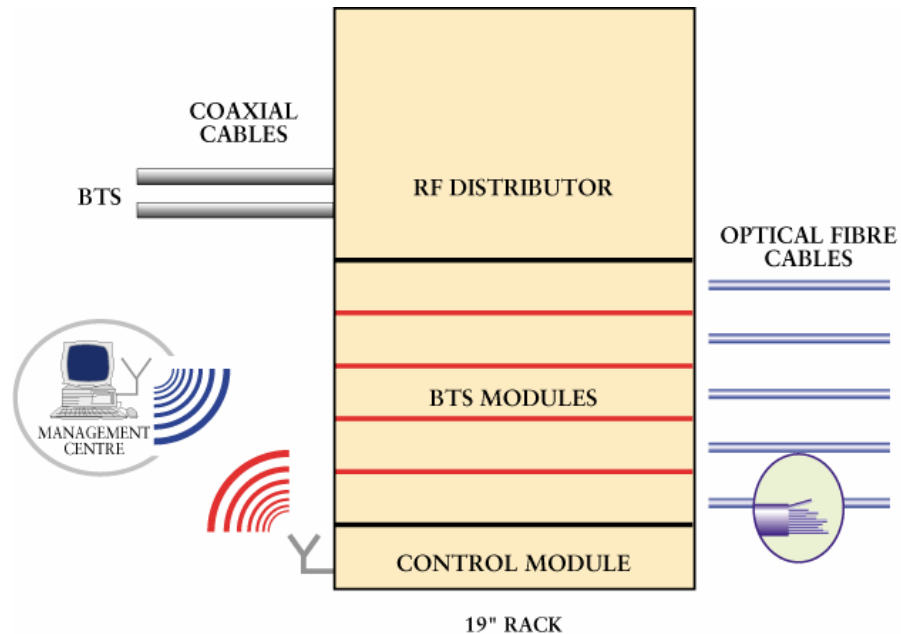


Figura 2.8.- Diagrama de Bloques del BTS (rack).¹

El BTS consiste en los siguientes elementos:

- Distribuidor RF. Esta es una interface entre el BTS y la parte de la conversión electro-óptica. Distribuye los canales de radio para emisión entre los varios enlaces a microceldas.
- Modulo BTS. Cada módulo BTS lleva a cabo las requeridas conversiones electro-ópticas entre las señales de radio provenientes del BTS y las señales de luz proveniente de los cables de fibra óptica. Hay dos emisores láser por módulo los cuales envían dos canales GSM al módulo de antena (enlace de bajada) y un diodo de luz que recoge la señal de luz proveniente del módulo de antena (enlace de subida). Esto significa que son necesarios

¹ Las figuras 2.7-2.14 fueron obtenidas de la siguiente dirección de Internet: www.tid.es

3 cables de fibra óptica para cada enlace de Modulo BTS-Módulo de antena que define una microcelda.

- Modulo de Control. Este módulo controla y supervisa los módulos BTS y los módulos de antena conectados a los cables de fibra óptica. El módulo de control se comunica con un sistema de administración residente en un computador remoto utilizando un canal de radio GSM. Para este propósito el módulo incluye un módem GSM y un cable coaxial conectado a una antena externa. También es posible establecer una conexión local vía RS-232.



Figura 2.9.- Módulo BTS. ¹

2.2.4. Modulo de antena

El módulo de antena realiza las necesarias conversiones electro-ópticas entre las señales de luz y las señales de radio enviadas y recibidas por la antena que cubre la correspondiente microcelda. La figura 2.10 (página 43) muestra detalles de la arquitectura del módulo.

¹ Las figuras 2.7-2.14 fueron obtenidas de la siguiente dirección de Internet: www.tid.es

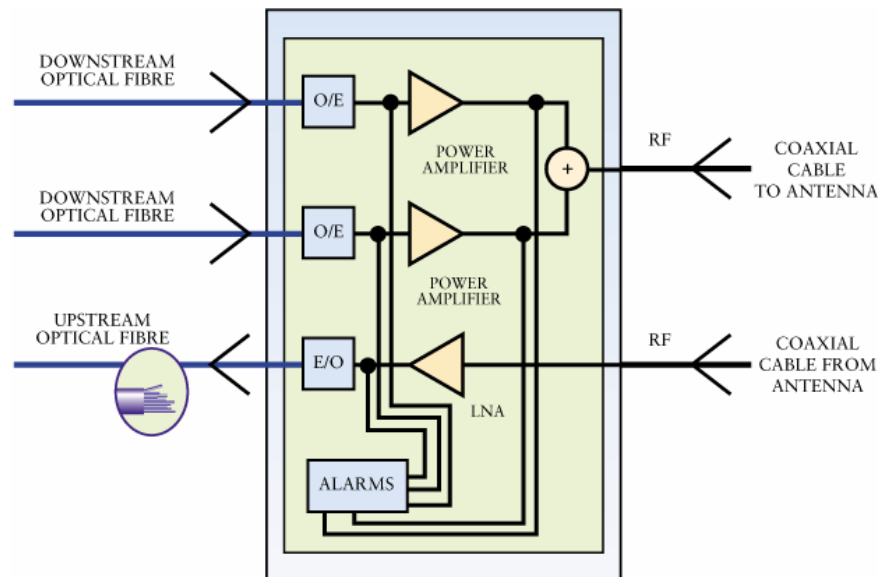


Figura 2.10.- Diagrama de Bloques del Módulo de Antena. ¹

Los dos canales de bajada GSM, los cuales son de fibra, son convertidos a radio frecuencia en el convertidor O/E, y son amplificadas al nivel requerido de potencia y puestas juntas para ir a través de un simple cable a la antena. Las señales recibidas por la antena (enlace de subida) son amplificadas por un amplificador de bajo ruido (LNA) y convertidas a frecuencias de luz en el convertidor O/E antes de transferir a la fibra la cual llevará la señal al modulo BTS correspondiente. Encajar dos canales de radio de 1 Watt en tan pequeño espacio fue por sí mismo un reto.

La figura 2.11 (página 45) muestra un Módulo de Antena, sus dimensiones son 295x187x103 mm. El tamaño pequeño es esencial si los módulos son instalados en edificios, para minimizar el impacto visual.

¹ Las figuras 2.7-2.14 fueron obtenidas de la siguiente dirección de Internet: www.tid.es



Figura 2.11.- Módulo de Antena. ¹

2.2.5. Centro de Administración

El sistema de administración para el equipamiento de radio sobre fibra esta basado en una aplicación para PC usando Windows.

La figura 2.12 muestra el monitoreo para una facilidad con 11 microceldas. Cada icono representa un enlace del BTS al correspondiente punto de antena. Pulsando con el ratón sobre estos el usuario puede obtener información sobre el estado de la transmisión en cualquier instante.

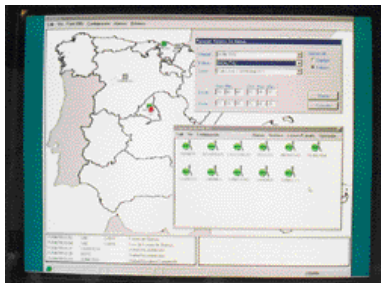


Figura 2.12. Panel de Control del Sistema de Administración.

¹ Las figuras 2.7-2.14 fueron obtenidas de la siguiente dirección de Internet: www.tid.es

El sistema de administración se comunica con el módulo de control del BTS a través de un canal de radio GSM. Esto permite monitoreo remoto del equipamiento, el sistema de administración no necesita estar situado junto a los enlaces de microcelda.

2.2.6. Ejemplo de una instalación en un edificio

La figura 2.13 siguiente muestra un diagrama de la instalación realizada en un edificio de 24 pisos.

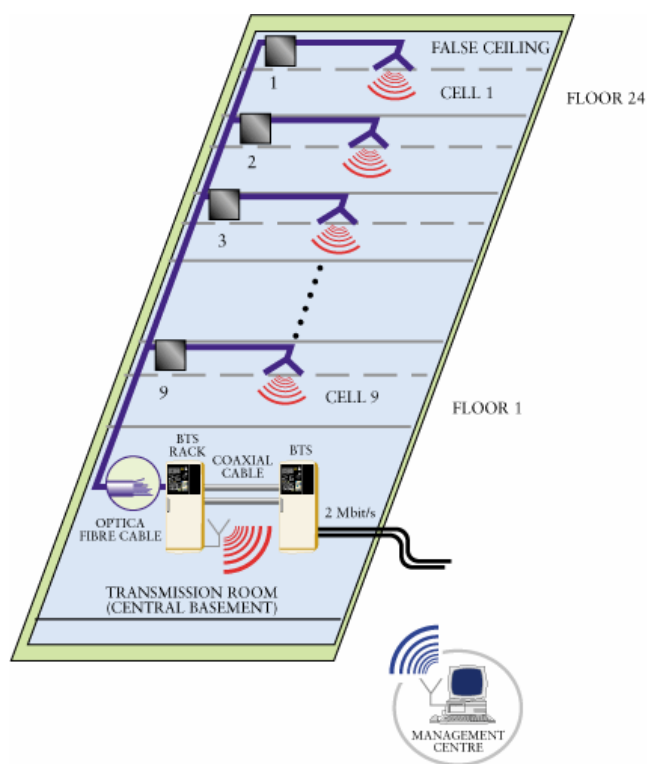


Figura 2.13.- Ejemplo de instalación en un edificio de 24 pisos. ¹

La estación base está localizada en la planta baja del edificio, donde está la sala de transmisión junto con otros equipos de comunicaciones.

Los cables de fibra van a los pisos superiores a través de los ductos existentes, debido a que los cables de fibra son inmunes a la interferencia.

Fue utilizado un total de 9 módulos de antena para cubrir los 24 pisos. Algunos módulos cubren dos pisos y otros cubren cuatro pisos consecutivos.

¹ Las figuras 2.7-2.14 fueron obtenidas de la siguiente dirección de Internet: www.tid.es

Los módulos de antena fueron instalados dentro de armarios ya existentes al final de cada piso, ocultos a la vista. Las antenas las cuales son de tipo monopolo fueron encajadas dentro del techo falso del piso correspondiente. En otras palabras el sistema no tiene impacto visual.

Las instalaciones de radio sobre fibra pueden responder a la creciente demanda para la tecnología móvil y al surgimiento de nuevos estándares de transmisión. Como ejemplo mostramos un equipamiento con tecnología dual, que puede funcionar simultáneamente en las bandas GSM y DCS-800. La fotografía de la figura 2.14 muestra un módulo de antena para uno de estos repetidores duales. En este caso el armario es mucho más grande, lo cual es natural considerando que son amplificados 4 canales para distribución en la celda, dos canales a 900 Mhz, y dos a 1800 Mhz, cada uno de aproximadamente 1W. Este nuevo equipamiento podrá funcionar con el mismo número de fibras ópticas como antes, a pesar de la capacidad incrementada. Con esto se puede lograr un mejor aprovechamiento de la infraestructura de fibra óptica existente.

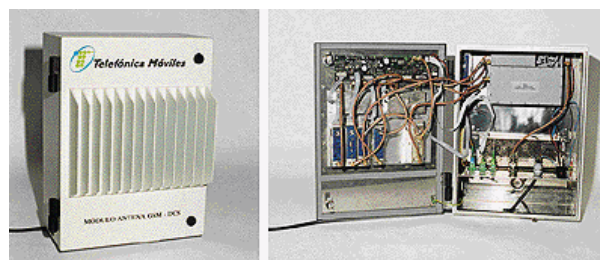


Figura 2.14.- Prototipo Repetidor Dual GSM/DCS-1800. ¹

¹ Las figuras 2.7-2.14 fueron obtenidas de la siguiente dirección de Internet: www.tid.es

III. ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN, PÉRDIDAS Y RUIDO EN LOS SISTEMAS PARA COBERTURA EN TÚNELES

3.1 POTENCIA IRRADIADA POR CABLE RADIANTE

Los cables coaxiales proporcionan a los ingenieros de sistemas de radio frecuencia la habilidad de controlar la potencia de radiación a lo largo de su longitud que es semejante al patrón de intensidad luminosa producido por un bulbo fluorescente, a diferencia de la emisión producida por una fuente puntual tal como un foco incandescente.

La fuente puntual puede producir el mismo nivel mínimo de luz en un cuarto que un bulbo fluorescente largo aunque la distribución de energía irradiada por este último es más pareja. El lado negativo de la fuente puntual es el exceso de iluminación en las cercanías de la fuente necesario para lograr el mínimo de intensidad en el perímetro del cuarto a ser cubierto. Tal cual se muestra en la figura 3.1 de la página 51.

En los casos de aplicaciones de radio frecuencia, observemos una aplicación típica comparando las antenas múltiples puntuales y el cable coaxial radiante. En la figura 3.2 y 3.3 se muestra la cobertura del piso de un edificio de 200 pies por 500 pies por los dos métodos.

El primer método mostrado en la figura 3.2, usa una distribución de antenas de fuente puntual conectadas a un cable coaxial central con uniones (taps) de 10 db de ganancia. Estas uniones proveen a las antenas extrayendo parte de la potencia coaxial sin afectar adversamente a la pérdida por inserción del sistema. El segundo método, figura 3.3, usa un único cable radiante de 500 pies de largo y 1/2 pulgada de diámetro. En ambos métodos se utiliza un generador de señales a 0dBm (1 mW) para alimentar al sistema desde el punto A.

La figura 3.4 muestra la intensidad de campo eléctrico (dBm relativo a un dipolo) para ambos métodos, con antenas puntuales y con cable coaxial radiante, recibida por un dipolo a medida que se va desplazando desde el punto A hacia el punto B.

La figura 3.4 muestra la media del campo de fuerza recibido por el receptor móvil al ser desplazado a lo largo de una línea que va del punto A al B, directamente por debajo del cable o las antenas, a una distancia de 8 pies. El espacio entre las antenas fue optimizado para que en el punto de cruce de las respectivas curvas de intensidad haya un nivel de -93 dBm (mínimo valor del campo de fuerza). El espaciamiento entre las antenas se va reduciendo progresivamente a medida que la atenuación del cable se incrementa, pero este espaciamiento es típico para la cobertura en sistemas de edificios. El decaimiento del campo de fuerza en las antenas se considera alrededor de 30 db por década o $\alpha = 3$, lo cual podría ser conservativo basado en evidencias experimentales. El decaimiento a través de la longitud del cable es proporcional a la atenuación del cable, en el caso de 4db por cada 100 pies.

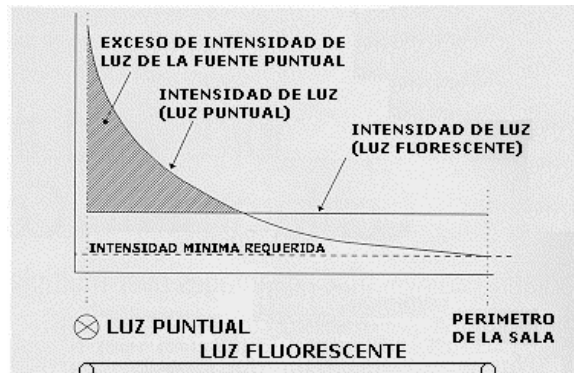


Figura 3.1 Analogía entre luz puntual y fluorescente¹

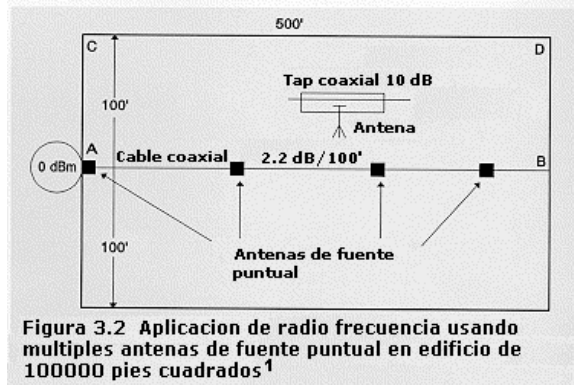
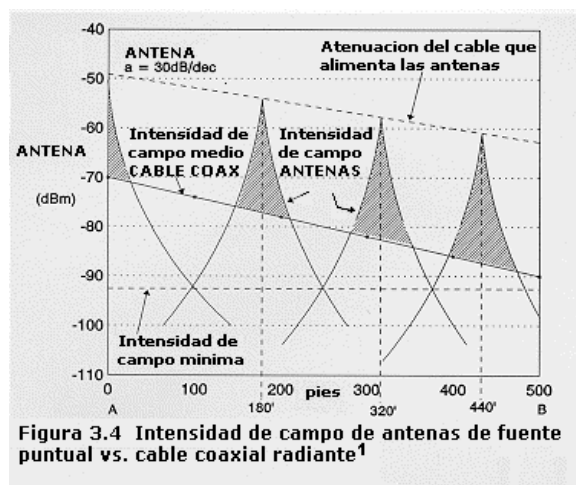
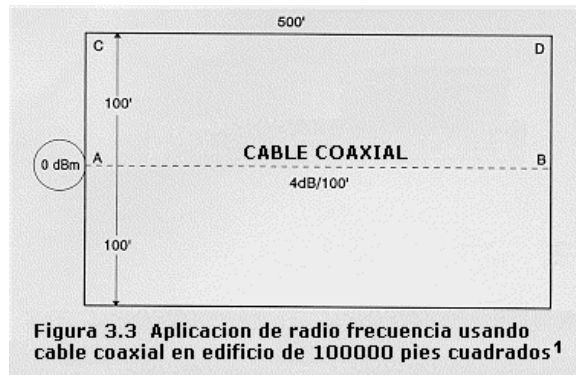


Figura 3.2 Aplicación de radio frecuencia usando multiples antenas de fuente puntual en edificio de 100000 pies cuadrados¹

Ambos sistemas proveen la cobertura necesaria puesto que el nivel de la señal es mantenido sobre el mínimo umbral. Sin embargo puede notarse los excesos del campo de fuerza en el caso de las antenas de fuente puntual, comparado con el cable radiante. Estos puntos con exceso de intensidad pueden potencialmente penetrar en zonas de cobertura adyacente, minimizando la capacidad de reuso eficiente de frecuencias. Por el contrario el cable distribuye su potencia uniformemente sobre su longitud, proveyendo una plataforma más eficiente para el reuso de las frecuencias.

¹Las figuras 3.1 hasta 3.9 fueron obtenidas en <http://educ.rfglobalnet.com>



La habilidad de distribuir la potencia con cable radiante minimiza los puntos con exceso de intensidad, que podrían ser evidentes dentro de un sistema basado en antenas puntuales. Estos puntos afectan adversamente la habilidad de reuso de frecuencias, reduciendo la capacidad del sistema para asignar más usuarios por canal. Esto es mostrado en el siguiente ejemplo:

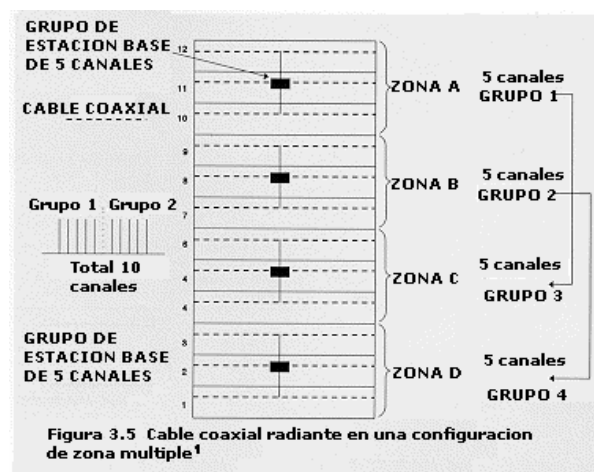
Consideremos un edificio de 12 pisos con 25 usuarios por piso (300 en total) que debe ser cubierto por un sistema de radio que provea cobertura a

¹ Las figuras 3.1 hasta 3.9 fueron obtenidas en <http://educ.rfglobalnet.com>

razón de 15 usuarios por canal. Una primera solución sería instalar un grupo de estación base de 20 canales (300/15), alimentando simultáneamente a todos los pisos ya sea con antenas puntuales, cable radiante o la combinación de ambos. Asumimos que 20 canales del espectro están disponibles para el diseño.

Nos preguntamos cómo minimiza los requerimientos del espectro manteniendo el promedio de usuarios de 15 por canal.

La respuesta es dividir el edificio en zonas y reusando el mismo grupo de frecuencias varias veces tal como se muestra en la figura 3.5.



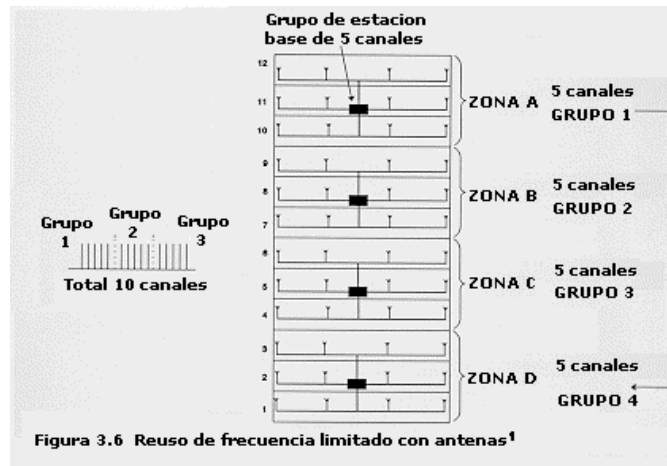
La figura 3.5 muestra 4 grupos de estaciones base, cada uno constituido por 5 canales.

Cada grupo de estación base sirve a tres pisos, conteniendo 75 usuarios en total. Este cumple el requerimiento de 15 usuarios por canal. La zona A usa 5 canales denotados como grupo 1 y estos se están reutilizando otra vez en la zona C.

¹ Las figuras 3.1 hasta 3.9 fueron obtenidas en <http://educ.rfglobalnet.com>

Los 5 canales del grupo 2 son usados en la zona B y zona D. Debido a la naturaleza controlada de la distribución de la señal vía cable radiante, es posible reusar las frecuencias en todas las zonas. Esto significa que solo 10 canales son necesarios para proveer el mismo nivel de servicio como el ejemplo de 20 canales. Además se asegura que la radiación hacia el exterior del edificio es mínima. Esto es especialmente importante para micro o pico celdas operando dentro del área cubierta por un sitio celular completo.

Dentro de un sistema con antenas puntuales proveyendo la cobertura al edificio, los puntos con exceso de intensidad pueden penetrar a través de varios pisos, afectando a las zonas alternas que reusan la misma frecuencia. En este caso, las antenas del grupo 1 del piso 10 podrían penetrar hasta el piso 6, dificultando el reuso de los canales del grupo 1 ahí. De esta manera se requerirá un grupo adicional de 5 canales (grupo 3) para cubrir los pisos 4, 5 y 6. Los canales del grupo 1 podrían entonces ser reutilizados en los pisos 1, 2 y 3. Esta solución requiere un total de 15 canales del espectro, ver figura 3.6. El cable radiante permite distribuir uniformemente la potencia a través de un área de cobertura, y proveerá el uso más eficiente del espectro.



Además de cumplir eficientemente los requerimientos técnicos, al construir un sistema de cobertura debe considerarse la simplicidad de instalación y el costo. El cable radiante provee al diseñador con recurso simple y confiable para solucionar los problemas de cobertura en edificaciones. Considérese por ejemplo el piso de un edificio de 45000 pies cuadrados con un cable radiante de 300 pies, instalado estéticamente por encima del techo (no visible), compárese la simplicidad de esta solución con la del uso de múltiples antenas puntuales (4 a 6) para proveer el mismo nivel de cobertura. Al utilizar cable radiante hay menos conexiones y terminaciones, aumentando la confiabilidad del sistema.

3.1.1. Factor de perfil para el cable radiante

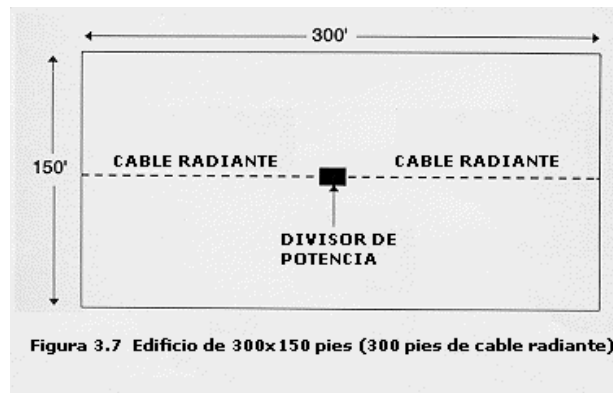
La definición del factor de perfil para el cable radiante (RPF) es simplemente el cociente entre el área de cobertura en pies cuadrados y la longitud necesaria de cable radiante. Observemos un ejemplo, sea el piso de un edificio de 150 pies por 300 pies con 300 pies de cable radiante, alimentado por el centro a través de un divisor de potencia, asumiendo que

el porcentaje de cobertura es aceptable, ver figura 3.7 (página **¡Error! Marcador no definido.**).

Para calcular el RPF en este sistema, divídase el total de pies cuadrados (300 x 150 = 45000) por la longitud del cable radiante, 300 pies.

$$\text{RPF} = 45000/300 = 150.$$

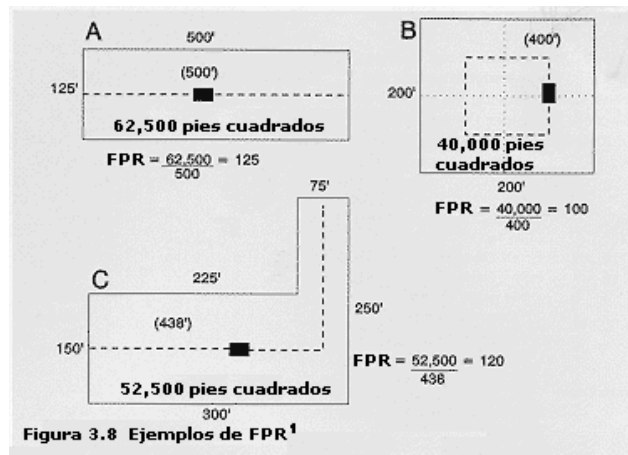
Este RPF de 150 significa que un pie lineal de cable radiante provee cobertura a 150 pies cuadrados en este ejemplo particular.



El RPF puede variar dependiendo de la construcción del edificio, la distribución de las oficinas y otras características. Basándose en experiencias y modelos de prueba, valores más grandes que 150 usualmente indican que se requiere más cable para proveer una cobertura confiable. Veamos otros ejemplos de planos típicos de pisos de oficinas, ver figura 3.8.

¹ Las figuras 3.1 hasta 3.9 fueron obtenidas en <http://educ.rfglobalnet.com>

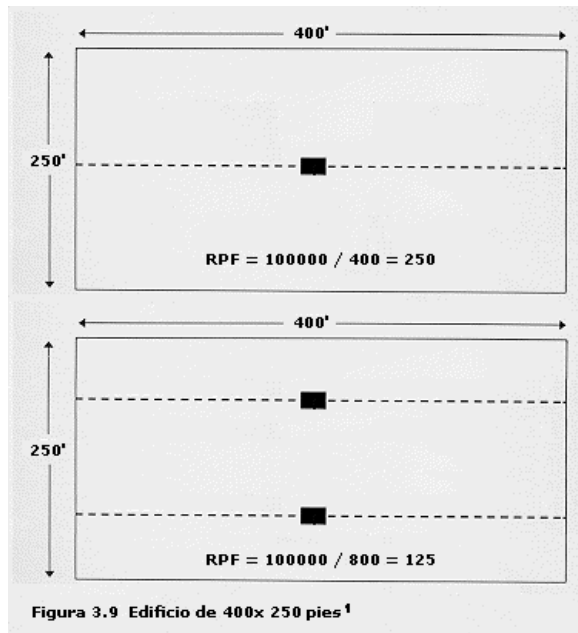
¹ Las figuras 3.1 hasta 3.9 fueron obtenidas en <http://educ.rfglobalnet.com>



En esa figura vemos que los valores de RPF son todos inferiores a 150, indicando una buena relación entre la longitud del cable y área de cobertura. Ahora consideremos un área de cobertura más grande y veamos como manejar situaciones donde el RPF es demasiado alto, ver figura 3.9.

En la parte superior se muestra un piso de 100000 pies cuadrados, implementado con un cable de 400 pies. El RPF es 250, valor demasiado alto para un cable radiante. El problema se debe a que la distancia perpendicular al cable llega a 125 pies, así el piso debe ser dividido en dos áreas cada una de 125 pies por 400 pies, lo cual se muestra en la parte inferior de la figura. Cada área es recorrida por 400 pies de cable radiante, requiriéndose 800 pies del cable, provyendo un RPF de 125 para un rendimiento aceptable sobre el área total.

¹ Las figuras 3.1 hasta 3.9 fueron obtenidas en <http://educ.rfglobalnet.com>



Usando este ejemplo, podemos evaluar el costo de instalación para la solución de cobertura, de acuerdo a la siguiente tabla:

| Tabla 3.1 Costo de la instalación | | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|-------------|---------|
| 800' | Cable Radiante (1/2") | \$ 4.00/pie | \$3,200 |
| 200 | Uniones de cable | \$ 0.25 cu | \$ 40 |
| 4 | Conectores tipo N | \$ 25.00 cu | \$ 100 |
| 4 | Terminadores tipo N (opcional) | \$ 23.00 cu | \$ 92 |
| 3 | Divisores de potencia de 2 vías | \$125.00 cu | \$ 375 |
| 1 | Jumper coaxial 60' | \$150.00 cu | \$ 150 |
| 4 | Tiras de aterrizaje | \$ 15.00 cu | \$ 60 |
| Costo total de materiales | | | \$4,017 |
| Instalación: | | | |
| 2 | Contratistas eléctricos | \$320/día | \$ 960 |
| | Arrendamiento equipo misc. | \$250 | \$ 250 |
| Costo total de labor | | | \$1,210 |
| Costo total del trabajo | | | \$5,227 |

¹ Las figuras 3.1 hasta 3.9 fueron obtenidas en <http://educ.rfglobalnet.com>

El costo total del proyecto es \$5277.00, y puede deducirse el costo de cobertura por cada 1000 pies cuadrados:

Costo por 1000 pies cuadrados = $1000 \times 5227 / 100000 = \52.27 por cada 1000 pies cuadrados.

Este costo utiliza valores típicos de materiales y labor. Los costos pueden variar entre fabricantes de materiales y localizaciones de la instalación.

En conclusión, los cables radiantes proveen un recurso confiable y simple para solucionar la cobertura en edificaciones. La distribución uniforme de potencia a lo largo de su longitud favorece el reuso de frecuencias. La instalación es simple y no costosa, resultando en una solución confiable, estéticamente agradable cuando son colocados por encima del techo.

3.2 PÉRDIDAS DEBIDA AL CABLE RADIANTE

3.2.1. Pérdida longitudinal (perdida por inserción)

La pérdida por inserción del cable es la medida de la atenuación que ocurre en el cable coaxial y es medida en dB por unidad de longitud. La atenuación es debida principalmente a las pérdidas de cobre y a la potencia que es irradiada desde el cable. La pérdida debida a la radiación es algo afectada por la proximidad del cable a otras superficies

El efecto es más pronunciado para cables que tienen baja pérdida por acoplamiento, sin embargo cambios significativos típicamente no ocurren cuando el espaciamiento de las ranuras es mayor que 1 pulgada.

3.2.2. Pérdida por acoplamiento

La pérdida por acoplamiento es definida como el cociente entre la potencia del cable y la potencia recibida por una antena dipolo a una distancia determinada del cable (especificada por el fabricante). Por ejemplo, si la potencia del cable es de 0 dBm y la potencia recibida por la antena dipolo es de -65dBm, entonces la pérdida por acoplamiento es de 65 dB. La distancia de la antena al cable puede ser de 2 metros, 6 metros, etc. El valor de la pérdida por acoplamiento es la media de los valores medidos a medida que el dipolo se desplaza paralelamente al cable.

Típicamente la energía irradiada del cable es polarizada. La mayoría de los cables radiantes tienen una polarización vertical dominante, sin embargo esto puede ser dependiente de la frecuencia.

3.2.3. Ejemplo de análisis de pérdidas para un edificio de 3 pisos

Existe un número de publicaciones que tratan sobre la propagación de ondas de radio en edificaciones. Ha sido objeto de investigación el análisis de propagación por trayectorias múltiples, o propagación de pulsos, así como consideraciones teóricas que consideran el modelamiento del canal y las características de desvanecimiento. Otros experimentos cuantifican la atenuación entre diferentes pisos de edificios.

Los resultados del análisis que haremos a continuación son basados en la realización de un procedimiento experimental usado para determinar la pérdida por acoplamiento de los cables radiantes, el cual ha sido aplicado exitosamente en túneles y espacio libre.

Describiremos un estudio realizado para un edificio de 3 pisos, en este estudio se realizaron mediciones de campos eléctricos utilizando una estación móvil, y se encontraron las pérdidas del sistema y por acoplamiento para las probabilidades de recepción de 5%, 50% y 95%. Usando el valor de la atenuación longitudinal del cable se puede determinar la longitud máxima permitida del cable. Similarmente, las mediciones permiten analizar las pérdidas debidas a los materiales de construcción y a la estructura del edificio.

Primero daremos una explicación de cada una de las pérdidas que se consideran en este experimento. Las pérdidas debidas al cable serán las pérdidas longitudinales dentro del cable. La pérdida por acoplamiento es la pérdida sobre espacio libre entre el cable radiante y la antena dipolo de media onda receptora. La pérdida del sistema, es la suma de todas las pérdidas, es el cociente del nivel de la señal recibido por la antena al nivel de señal que alimenta el cable. Usando mediciones comparativas, las pérdidas individuales así como las atribuidas al material de construcción, pueden ser determinadas.

3.2.3.1. Datos del Edificio

Fueron realizadas mediciones en un edificio de oficinas de 3 pisos sobre una longitud de 32 metros. Un corredor corre en medio de cada piso, y a los lados del corredor se encuentran múltiples oficinas. La construcción de las paredes es de bloques de 12 cm de grueso y el suelo es de 16 cm de concreto reforzado. Todo el cielo raso es de cuadrados de yeso. En la planta baja, a los lados del corredor central hay oficinas de laboratorios con puertas interconectoras. En cada oficina hay armarios de herramientas y otros materiales.

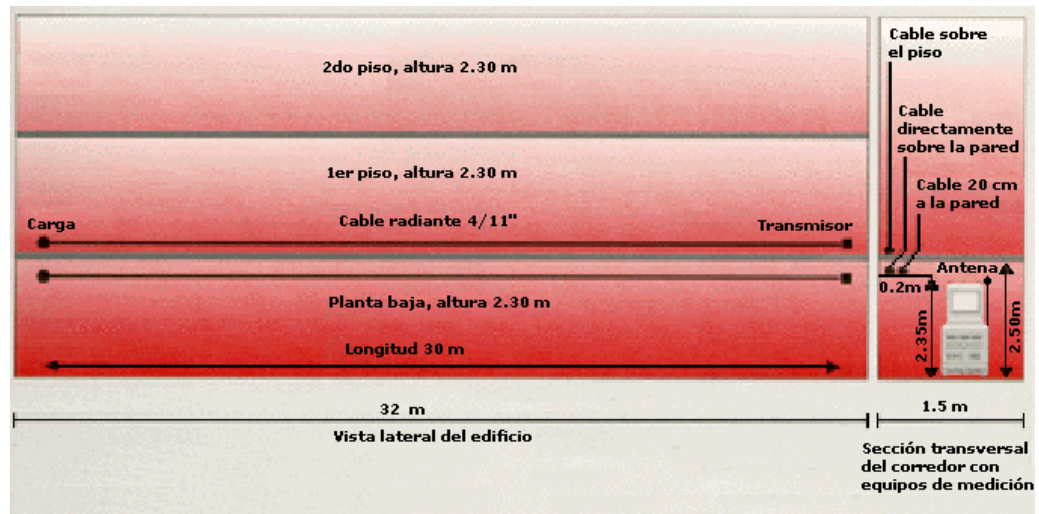


Figura 3.10.- Vista del edificio ¹

La mitad izquierda de la figura 3.10, muestra una vista lateral del edificio, la parte derecha muestra una sección transversal del corredor la cual incluye varias posiciones del cable radiante y el equipo de medición computarizado. Para las dos posiciones del cable hay soportes de madera. Las posiciones son 2 cm y 20 cm desde la pared. Adicionalmente, se hizo mediciones con el cable directamente sobre el piso.

Se hizo un experimento para establecer la influencia de un ducto para cables. El ducto consiste de una lámina larga de acero de 30 cm de ancho, cerca del cielo raso en el corredor del sótano del edificio (no mostrado en la figura). El corredor es de aproximadamente 2 metros de ancho y 2.50 m de altura.

¹ Las figuras 3.10 hasta 3.14 fueron obtenidas en <http://www.rfs.de>

El equipo central de mediciones (móvil) lleva un receptor controlado por computadora. La antena es un dipolo vertical de media onda. Se tomaron 40 muestras por longitud de onda para asegurar alta resolución.

El programa de la computadora calcula la pérdida del sistema y la probabilidad de recepción.

El cable radiante utilizado en este ejemplo es del tipo RLK 4.4/11.1, es un cable coaxial de 50 Ohm con un dieléctrico de polietileno y 1/2 pulgada de diámetro. Debido a la configuración de las ranuras del conductor externo, el cable opera en el modo radiante para frecuencias de aproximadamente 130 Mhz, y suprime modos de orden alto para frecuencias de aproximadamente 1000 Mhz. Por debajo 130 Mhz, el cable opera en el modo acoplado. El principio de funcionamiento del cable es comparable al de un arreglo de fase debido al espaciamiento de los grupos de ranuras. El rango de frecuencia operativa se extiende a 2 Ghz. Fueron realizadas mediciones a lo largo del cable de 30 m de longitud en los corredores de los 3 pisos del edificio, en los laboratorios adyacentes en la planta baja y corredor central de esta planta.

| | |
|--|---|
| 1. Frecuencias medidas: | 75, 150, 450, 900, 1800 MHz |
| 2. Mediciones de la pérdida del sistema: | Efecto de la posición respecto a la pared, proximidad al piso y a un ducto de cables. |
| 3. Mediciones de la pérdida del cable: | A todas las frecuencias con el cable sobre la pared y piso, ver figura 3.10 |
| 4. Cálculo de pérdidas: | Debido a techos y paredes. |

3.2.3.2. Resultados

A.- Pérdida debida al cable:

La pérdida longitudinal del cable fue medida en cada una de las frecuencias. La figura 3.11 muestra los resultados en un conjunto de puntos para varias posiciones del cable. En cada caso, la pérdida longitudinal equivalente para 100 m de cable es dada por una comparación fácil con los valores obtenidos en las hojas de especificaciones del fabricante del cable.

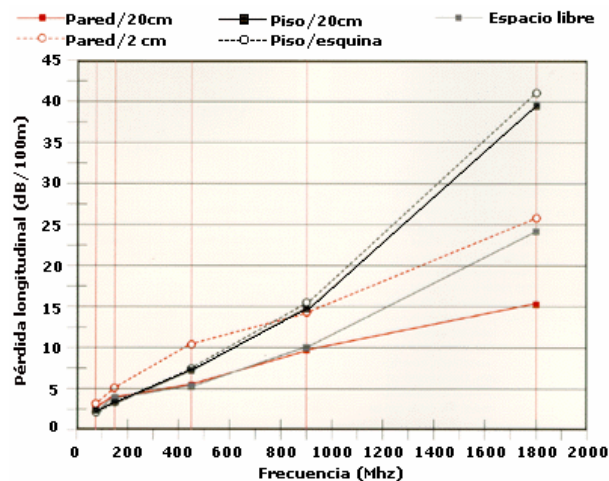


Figura 3.11.- Efecto de la posición del cable sobre la pérdida longitudinal.¹

No sorprende que las pérdidas a 20 cm de la pared a 900 Mhz, son comparables con las indicadas en la hoja del fabricante, aquí se asume que

¹ Las figuras 3.10 hasta 3.14 fueron obtenidas en <http://www.rfs.de>

el campo no es afectado. A 1800 Mhz, sin embargo, las pérdidas son de 7dB/100m menores que en el espacio libre. Este resultado sorprendente ha sido confirmado por mediciones adicionales.

Reduciendo la distancia de la pared a 2 cm, resulta en un incremento de la pérdida longitudinal de 5dB/100m a 450 Mhz. A bajas frecuencias el efecto es despreciable. Con el cable sobre el suelo resulta en un incremento significativo de la pérdida longitudinal a 1800 Mhz (15 Db/100m). A 450 Mhz, sin embargo, el incremento de la pérdida sobre el piso es menos crítico que el incremento debido a la cercanía a la pared.

Los resultados muestran que, para frecuencias de 450 Mhz y superiores, se deben tomar en cuenta pérdidas longitudinales adicionales si el cable está cercano a la pared. Si está sobre el suelo, sin embargo, el incremento de esta pérdida es solo significativo a frecuencias superiores a 900 Mhz.

B.- Pérdida del sistema:

El cambio en la pérdida del sistema debido a la posición del cable es de particular interés. En las figuras 3.12a y 3.12b se comparan resultados para 20 cm y 2 cm de distancia a la pared. En ellos no hay cambios significativos, excepto cuando el cable es medido en el corredor en el cual este es montado, a altas frecuencias, notablemente 1800 Mhz, donde las pérdidas longitudinales a 20 cm son reducidas, ver la figura 3.11. Este efecto desaparece, sin embargo, cuando el cable y la antena receptora son separados por paredes o cielo raso.

La reducción de la separación de la pared a 2 cm da como resultado un incremento en la pérdida del sistema de máximo 5 dB, ver figura 3.12b.

A 450 Mhz, la pérdida del sistema es reducida en algunos casos. En este edificio, usando un cable de esta longitud, la pérdida en un piso o entre 2 pisos es menor que 90 dB a una probabilidad de recepción de 95%.

La atenuación entre 3 pisos (atravesando 2 cielos rasos) es menor que 110dB/95%. Se consideró el siguiente caso extremo: el cable tendido en el suelo del primer piso y midiendo el nivel de la señal de radio que alcanza a los dos niveles inmediatamente adyacentes. Pero aún así, la atenuación total en ese caso o en el caso de pared mas piso, es inferior que 100 dB/95%, ver figura 3.13.

Como resultado, la cobertura de radio frecuencia en los 3 pisos es posible usando un solo cable si la portadora es de 20 dBm y si se requiere un mínimo nivel de recepción de -80 dBm a 95%. El rango dinámico del sistema es entonces 20 dB, excepto un máximo de 30 dB ocurriendo a bajas frecuencias.

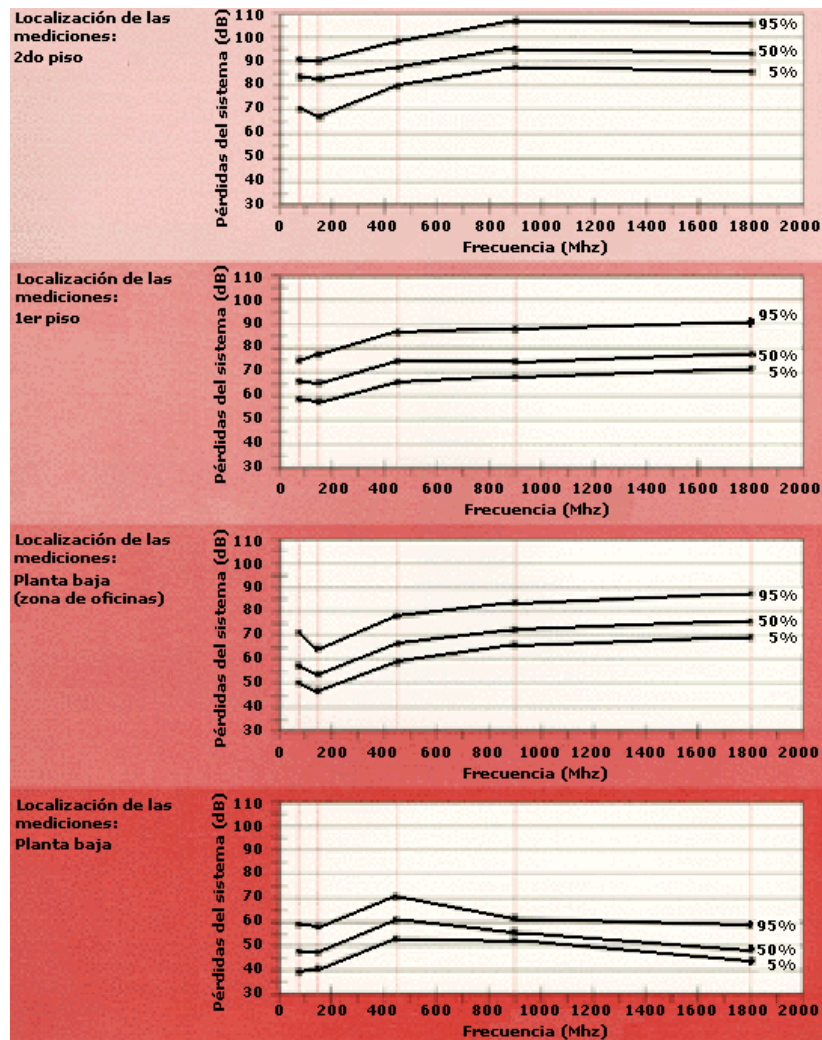


Figura 3.12a.- Pérdida del sistema entre el cable y varias localizaciones (posición del cable: planta baja, 20 cm a la pared).¹

¹ Las figuras 3.10 hasta 3.14 fueron obtenidas en <http://www.rfs.de>

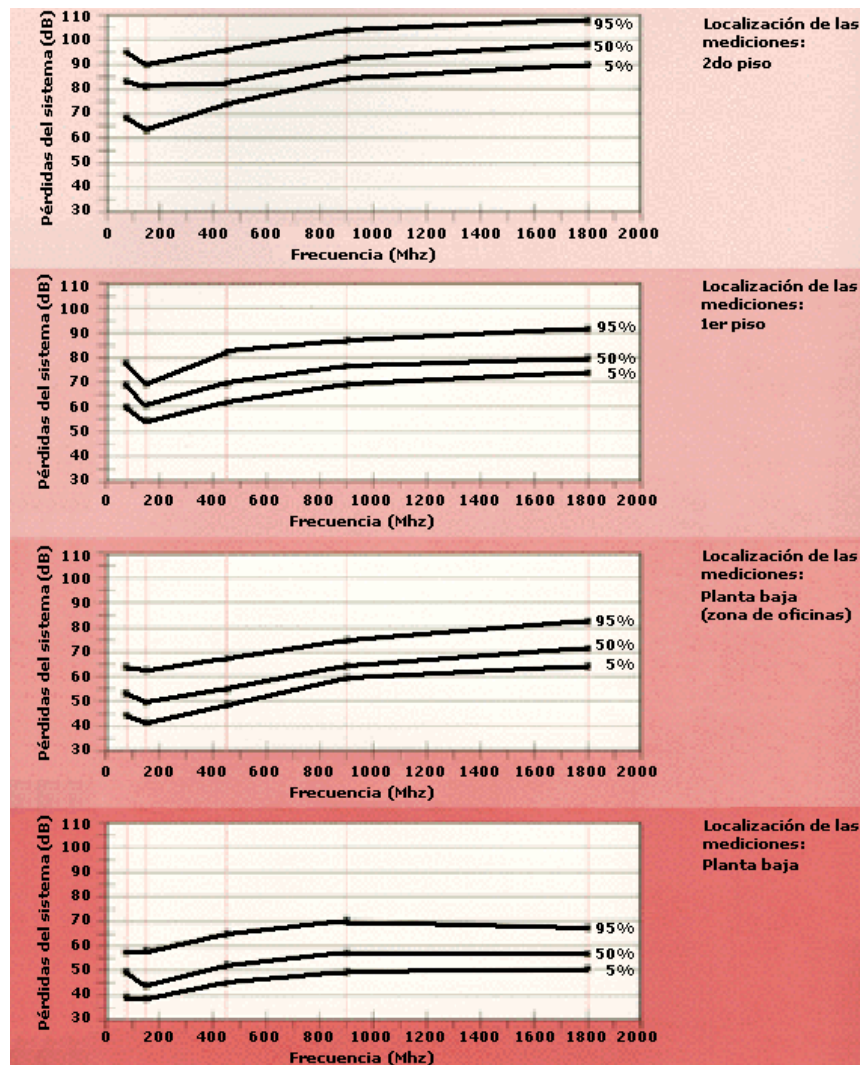


Figura 3.12b.- Pérdida del sistema entre el cable y varias localizaciones (posición del cable: planta baja, 2 cm a la pared).¹

¹ Las figuras 3.10 hasta 3.14 fueron obtenidas en <http://www.rfs.de>

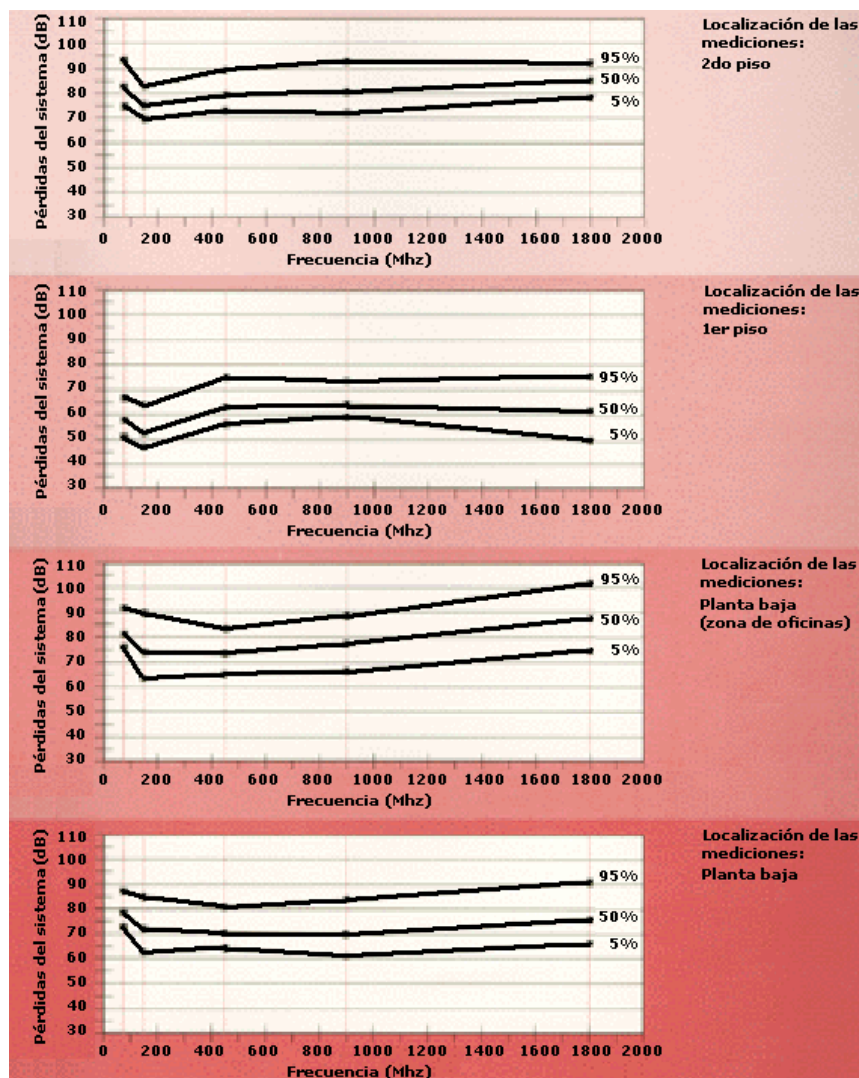


Figura 3.13.- Pérdida del sistema entre el cable y varias localizaciones (posición del cable: primer piso, sobre el suelo) . ¹

C.- Atenuación debida al edificio.

La figura 3.14 muestra varias pérdidas debidas al edificio con el cable posicionado a diferentes distancias de la pared y sobre el suelo del primer

¹ Las figuras 3.10 hasta 3.14 fueron obtenidas en <http://www.rfs.de>

piso. Estas pérdidas muestran una marcada dependencia de la posición del cable. Para explicar este efecto se requeriría una investigación profunda en cuanto al comportamiento de los campos eléctricos en esas situaciones.

La influencia del ducto metálico de cables fue medida instalando el cable en el ducto del corredor del sótano del edificio, y realizando mediciones en condiciones similares a las anteriores.

Los resultados son comparables a los obtenidos en las mediciones cuando el cable fue instalado en el corredor de la parte principal del edificio a 2 cm de la pared. Así, el efecto de la instalación en el ducto no tendría consecuencias siempre que el cable radiante no sea cubierto por otros cables.

En conclusión, se hizo una investigación para analizar la conveniencia de cable radiante de poco diámetro para cobertura en banda ancha en un edificio con frecuencias entre 75 y 1800 Mhz. Un solo cable es suficiente para proveer cobertura a tres pisos sobre el rango de frecuencias completo, aún si el cable esté simplemente sobre el suelo. La pérdida del sistema permanece por debajo de 100 dB en todos los casos para la probabilidad de 95% de recepción.

El rango dinámico del sistema es menor que 20 dB para frecuencias sobre 150 Mhz en todos los casos, siempre que no más de una pared o cielo raso es penetrado. Bajo ciertas condiciones, la cobertura del siguiente piso, pero solo uno, es posible. El uso de materiales comunes para sostener el cable no conlleva alguna ventaja en instalaciones dentro de edificios. En lugar de eso, el cable puede simplemente yacer sobre materiales no conductivos tales como madera emplastada. El efecto de materiales conductivos entre pisos o en las paredes depende de su estructura y del rango de frecuencia.

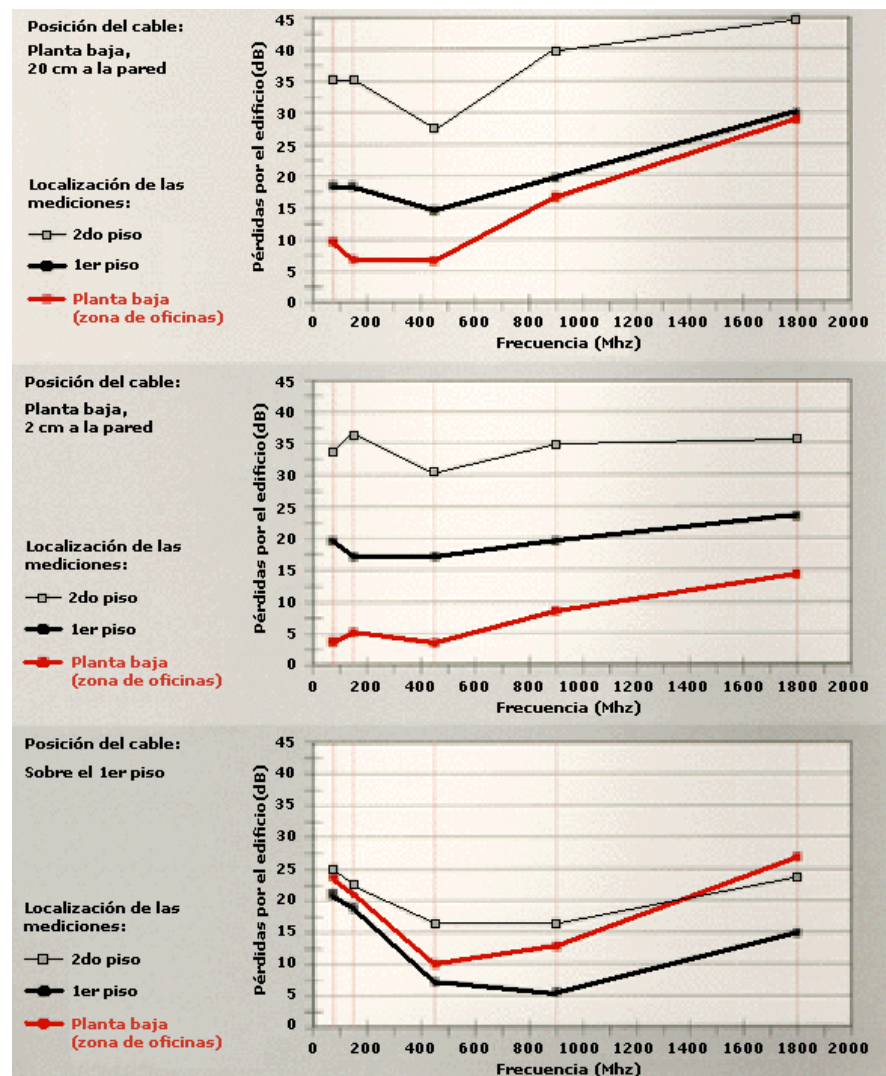


Figura 3.14.- Pérdida debida al edificio entre varias posiciones del cable y el equipo de medición (basado en el porcentaje de cobertura del 50%).¹

¹ Las figuras 3.10 hasta 3.14 fueron obtenidas en <http://www.rfs.de>

3.3 ATENUACIÓN DEBIDA A UNA ESTRUCTURA SÓLIDA (UTILIZANDO ANTENAS)

Vamos a asumir una antena de transmisión a 900 Mhz con un ERIP de 39 dBm, colocada a 100 metros de distancia de la entrada de un túnel para trenes, la medida de la entrada es 20 metros cuadrados (sección transversal). También asumimos propagación de espacio libre desde la antena hacia la entrada del túnel.

Nos preguntamos acerca de la potencia de la señal recibida dentro del túnel, a x metros de la entrada del mismo, con una antena receptora de 0 dBi.

Si el túnel es recto y con un material altamente conductivo en su superficie, entonces la onda de entrada podría reflejarse en la superficie interna del túnel (a ángulos no pronunciados) , y la potencia de la señal a x metros podría ser una función muy complicada (casi caótica), la cual depende de como las ondas se suman en cualquier punto particular en el espacio tridimensional (x,y,z) . Podría haber nulos y puntos de foco. En la práctica, podría ser un gran enredo y los nulos podrían arruinarnos el día.

Si el túnel fuera construido con material absorbente, entonces no habría reflexiones y la fuerza de la señal a x metros podría simplemente ser la debida al espacio libre, esto es ignorando el túnel (asumiendo que el túnel es recto).

Los dos casos arriba mencionados ponen límites a la respuesta . El factor dominante sería la pérdida en la trayectoria de espacio libre. Cualquier reflexión probablemente va a restar más de la señal de lo que sumaría.

Ignorando las reflexiones y asumiendo un túnel paralelo y también asumiendo una línea directa entre el transmisor y el receptor, entonces los cálculos de la intensidad de campo son exactamente las mismas que en el espacio libre. Simplemente se calcula la potencia recibida como una función de $100 + x$ metros.

Si se incluyen las reflexiones, entonces se debe asumir que todas ellas emanan de los bordes de la entrada del túnel y que los nulos y picos están localizados a intervalos de 333 mm a partir de ahí. La intensidad reflejada es altamente dependiente de la forma del túnel.

IV. EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA COBERTURA EN TÚNELES Y EDIFICIOS

4.1 SUMINISTRO DE POTENCIA PARA EXTENSIONES DE RED CELULAR

Las redes de comunicación celular requieren el uso de repetidores (especialmente en áreas de sombra) los cuales son específicamente diseñados para resolver problemas de cobertura insuficiente en situaciones especiales.

Los túneles son algunos de los casos más comunes. Varias tecnologías de repetidores tales como cable radiante, antenas alimentadas con cable coaxial común o con cable de fibra óptica, son utilizadas dependiendo de las distancias a ser cubiertas. Un diferente tipo de suministro de potencia es utilizado con cada una de estas tecnologías. Un gabinete central de potencia es siempre incluido. Este gabinete, el cual generalmente se encuentra instalado al inicio del camino a dar cobertura, recibe su potencia desde las líneas eléctricas públicas y debe continuamente suministrar el tipo de potencia requerido por el sistema repetidor elegido. El gabinete puede contener fuentes de poder, baterías, o convertidores DC/AC o AC/DC. En ciertos casos es equipado con un mecanismo de transmisión de radio que provee comunicación con la estación base de radio más cercana.

La potencia suministrada por el gabinete es extraída desde su línea de salida a intervalos de 250-500 metros y es entregada al sistema de radio frecuencia.

Las señales de radio frecuencia (0.45-1.8 GHz) y ciertas señales de supervisión (75-455 KHz) pueden ser devueltas a la línea de salida de suministro de potencia, cuya resistencia puede variar entre 2 y 20 ohm. En situaciones especiales tales como los túneles, las corrientes inducidas por el tránsito de vehículos o locomotoras (los cuales manejan corrientes que exceden los 5000) deben ser tomadas en consideración. Los principios para el diseño de proyectos incluyen la elección de voltajes y tipos de corriente (continua o alterna), grado de protección especificado para el equipo, método para manejar potenciales de tierra en la presencia de corrientes inducidas que pueden producir mal funcionamiento, y regulaciones de seguridad. Vamos a considerar diversas soluciones y presentar los sistemas actualmente operativos además de evaluar proyectos a ser implementados en el futuro.

4.2 DIFERENTES MANERAS DE EXTENDER LAS SEÑALES CELULARES

Como dijimos los límites de cobertura de una estación base de radio pueden ser extendidos usando repetidores que retransmiten una banda de portadoras desde la estación base más cercana dentro del área a ser servida. El método más simple para lograr este objetivo es usar una antena de radio de transmisión-recepción apuntando hacia la estación base, un amplificador bidireccional y un elemento radiante (por ejemplo una antena) cuyas características espaciales de transmisión (rango, ángulo de apertura y ángulo de curvatura) puede controlarse suficientemente.

Las antenas son elementos radiantes utilizados generalmente cuando las áreas a ser cubiertas son rectas. Por otro lado, los cables radiantes son utilizados cuando los planos verticales y horizontales son curvos. Nosotros vamos analizar los dos casos separadamente.

4.2.1. Sistema Antena-Antena

Como podemos observar en la figura 4.1, un sistema repetidor celular de tipo antena-antena se realiza con una antena RBS(estación base de radio), un amplificador de radio frecuencia y una antena RMA.

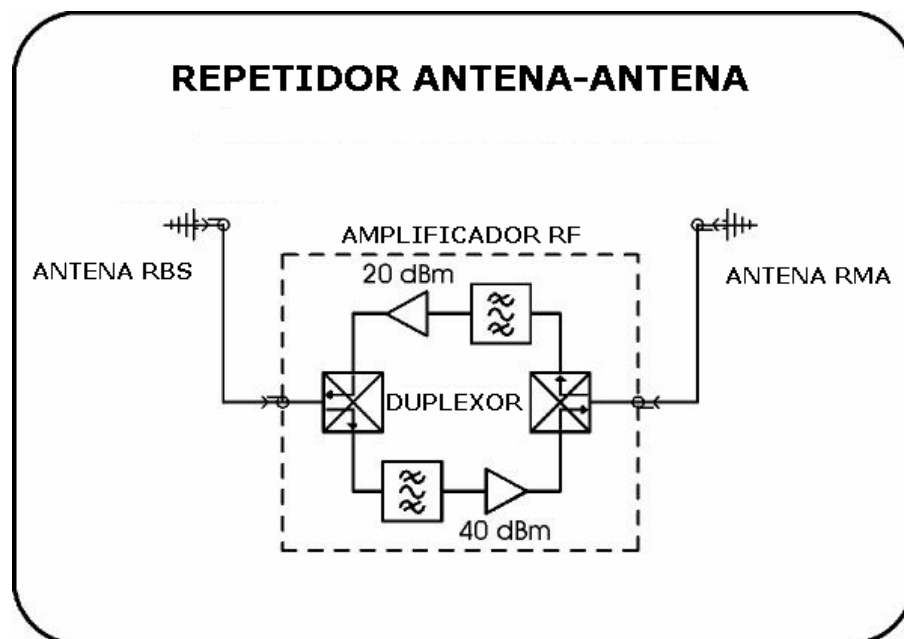


Figura 4.1.- Repetidor celular antena-antena. ¹

¹ Las figuras 4.1 a 4.12 fueron obtenidas en <http://www.drtec.com>

La señal recibida por la antena RBS (desde el RBS más cercano), es amplificada y enviada a la antena RMA, la cual apunta hacia el área de sombra a ser iluminada. La señal proveniente de la estación móvil es recibida por la antena RMA, es tratada de la misma manera y enviada a la estación base. Las características de los tres elementos que hacen este sistema son las siguientes:

Antena RBS.- La antena RBS, la cual es simple en diseño debe proveer buena ganancia y buen aislamiento a la señal irradiada por la antena RMA. Debe ser lo suficientemente direccional para que no reciba las otras bandas de la estación base. Esta antena es generalmente Yagui con 4-5 directores.

Antena RMA.- Esta antena es más compleja que la antena RBS, puesto que debe proveer excelente ganancia y en ciertos casos un relativamente agudo ángulo de radiación, así como polarización circular del campo electromagnético cuando es utilizada en túneles. Es también generalmente una antena Yagui o una antena de tipo helicoidal.

Amplificador.- El amplificador bidireccional es un elemento fundamental en un sistema repetidor celular. Debe ofrecer excelente selectividad (las frecuencias utilizadas en los sistemas GSM y TACS son adyacentes a las frecuencias de televisión UHF) y una excelente figura del ruido. También, el duplexor debe proveer una separación excepcional entre los dos lados. En muchos casos un número de compañías de telefonía celular debe ser servido en el mismo área. Como resultado el amplificador debe ser capaz de selectivamente manejar solamente ciertos canales recibidos de las estaciones base localizadas en esa área. Finalmente, el consumo de potencia eléctrica debe ser tomado en consideración, puesto que el nivel

de consumo puede limitar (al menos desde el punto de vista económico) el uso de repetidores celulares en ciertos casos.

4.2.2. Sistemas de Antena-Cable

En estos sistemas (ver Figura 4.2), los cuales son idénticos al sistema descrito arriba en cuanto a la antena RBS y amplificador bidireccional, el elemento radiante no es una antena sino un cable coaxial radiante.

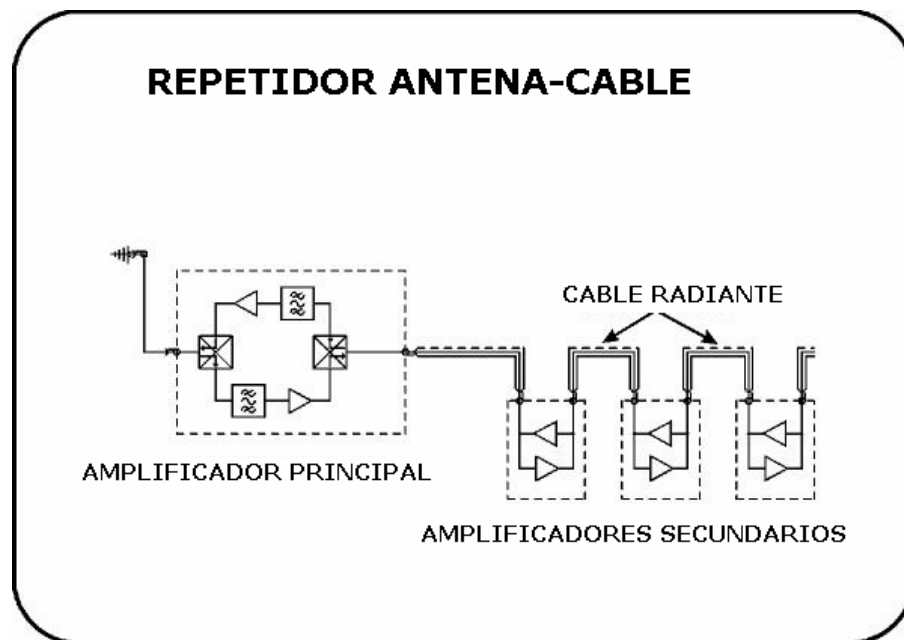


Figura 4.2.- Repetidor Celular Antena-Cable. ¹

¹ Las figuras 4.1 a 4.12 fueron obtenidas en <http://www.drtec.com>

Los sistemas antena-cable son usados cuando el área a ser iluminada es muy grande (sobre los 10 Km) y curvada a lo largo de los ejes horizontal y vertical. Los elementos adicionales en este sistema respecto al sistema anterior son los siguientes:

Cable Radiante.- Este tipo de cable coaxial es equipado con ranuras a lo largo del recubrimiento externo las cuales permiten que la señal de radio-frecuencia sea emitida. Las principales especificaciones para este cable son:

- Diámetro externo 33mm
- Impedancia típica 50 ohm
- Pérdidas a 1 GHz < 40 dB/km
- Resistencia eléctrica < 2ohm/km

Amplificadores Secundarios.- Así como podemos notar en las especificaciones del cable, la pérdida de la señal a una frecuencia de 1 Ghz es aproximadamente 40dB/km. Por esta razón, la señal recibida desde el lado RBS (y viceversa) debe ser amplificada a intervalos establecidos de distancia y con una ganancia igual a la pérdida inherente en el cable. Así la ganancia debería ser de 10 dB si los amplificadores están localizados cada 250 metros, 20dB si están colocados cada 500 metros y así sucesivamente. Para obtener un campo uniforme y optimizar el consumo de energía, se utilizan generalmente solo intervalos de distancia de 250/500/750 metros, con ganancias de 10/20/30 dB respectivamente. El amplificador debería ser lo suficientemente selectivo aun cuando no sea requerido un filtro de separación de canales debido a que la señal desde el amplificador principal ya ha sido propiamente filtrada.

4.3 POTENCIA ELÉCTRICA REQUERIDA POR LOS SISTEMAS DE EXTENSIÓN CELULAR

4.3.1. Sistemas Antena-Antena

En este tipo de sistema el cual incluye una o varias antenas transmisoras y receptoras así como amplificador bidireccional selectivo, solamente se encuentra presente una estación de radio frecuencia. Esta estación generalmente requiere solamente un voltaje de entrada (24 o 48 VDC) y usa 200-400 Watts.

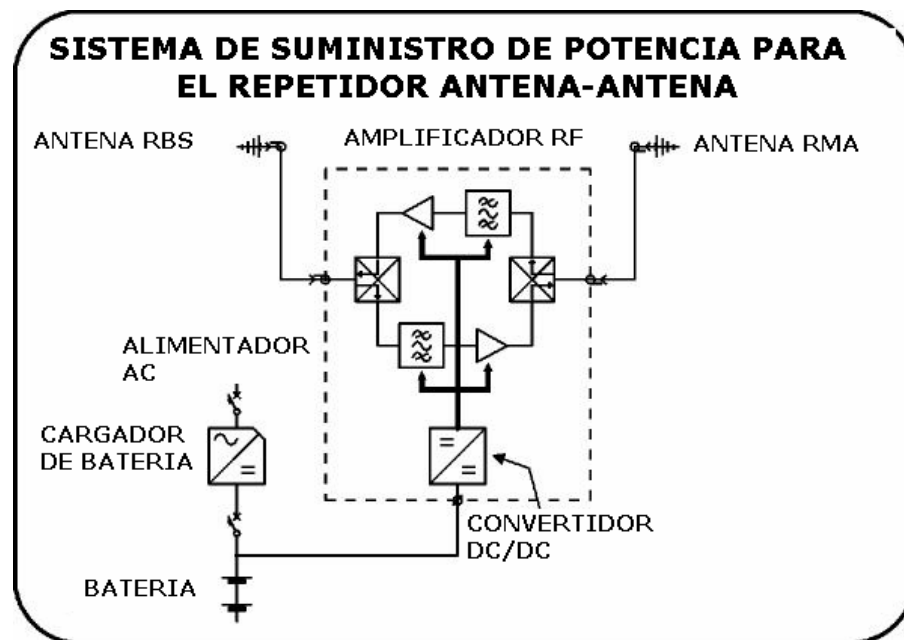


Figura 4.3.- Sistema Antena-Antena: Distribución de Energía Eléctrica.¹

¹ Las figuras 4.1 a 4.12 fueron obtenidas en <http://www.drtec.com>

Unidad de Radio Frecuencia Primaria.- Así como podemos ver en la figura 4.3 la potencia de 24 o 48 VDC es suministrada a los componentes operativos por un convertidor DC/DC instalado en la unidad de radio frecuencia.

Se puede utilizar una de dos soluciones para suministrar este voltaje, dependiendo del grado de confiabilidad requerido por el servicio celular y la confiabilidad de la fuente de poder AC.

- Una fuente de poder AC/DC utilizada en lugar del convertidor DC/DC
- Un sistema de continuidad suministrando la potencia DC

La confiabilidad del servicio provista por la primera solución, la cual es suficientemente bien conocida, depende de la confiabilidad de la fuente de potencia AC. La segunda, solución menos convencional, consiste en los siguientes componentes.

- Una fuente de poder AC/DC actuando como cargador de batería
- Un banco de baterías

En este caso, la confiabilidad del servicio no depende de la confiabilidad de la fuente de poder AC, puesto que la potencia DC puede ser suministrada por las baterías si la potencia AC falla. Puesto que un banco de baterías es utilizado, la unidad de radio frecuencia debe estar en capacidad de funcionar sobre un amplio rango de voltajes (generalmente $48 \text{ VDC} \pm 20\%$) que son generados cuando las baterías son cargadas y descargadas.

4.3.2. Sistemas Antena-Cable

Este tipo de sistema consiste en una o varias antenas receptoras, un amplificador bi-direccional selectivo localizado afuera del túnel (amplificador primario) y una serie de amplificadores bi-direccionales selectivos localizados dentro del túnel (amplificadores secundarios). El amplificador primario es similar al usado en los sistemas Antena-Antena. Sin embargo, los amplificadores secundarios pueden usar 5-50 Watts de potencia, y los voltajes de entrada requeridos por sus circuitos de radio-frecuencia pueden variar entre 5 y 12 V.

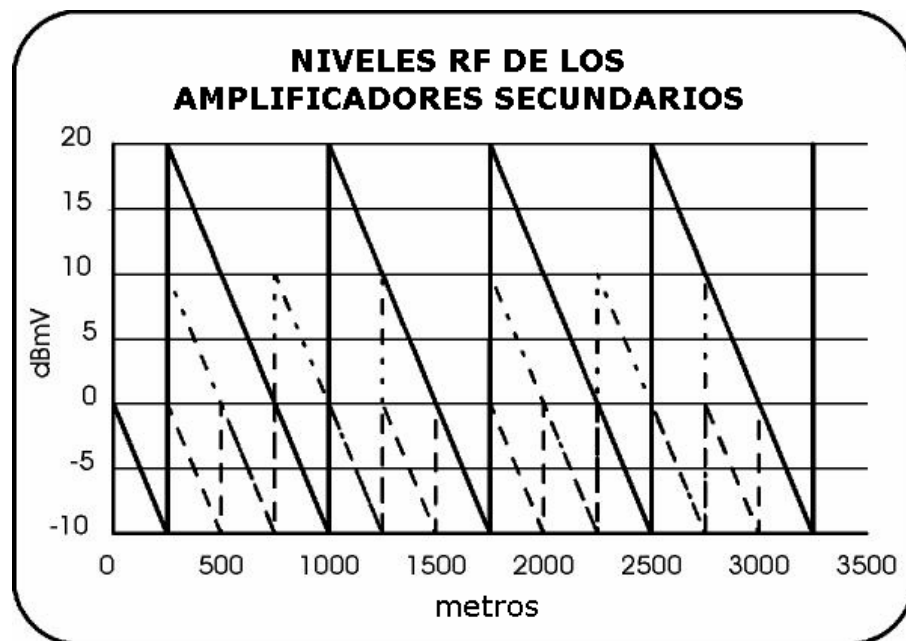


Figura 4.4.- Niveles RF en Amplificadores Secundarios. ¹

Las diferencias significativas en potencia manejadas por estos amplificadores dependen de los intervalos de distancia en los cuales ellos son instalados dentro del túnel.

¹ Las figuras 4.1 a 4.12 fueron obtenidas en <http://www.drtec.com>

En la figura 4.4 se muestra amplificación en intervalos de 250/500/750 metros, con una amplificación de ganancia 10, 20 y 30 dB respectivamente en cada caso para asegurar el nivel mínimo de señal de -10dBmV (umbral para garantizar un campo de señal que sea lo suficientemente fuerte para proveer conexión entre la estación móvil y el repetidor). En términos de potencia de radio-frecuencia, estas ganancias son equivalentes a aproximadamente 1,10 y 100 mW.

La figura 4.5 muestra la potencia de radio-frecuencia introducida en la línea en estas tres configuraciones. La potencia manejada por cada uno de estos amplificadores es proporcional a los valores de la potencia de radio-frecuencia introducida en la línea.

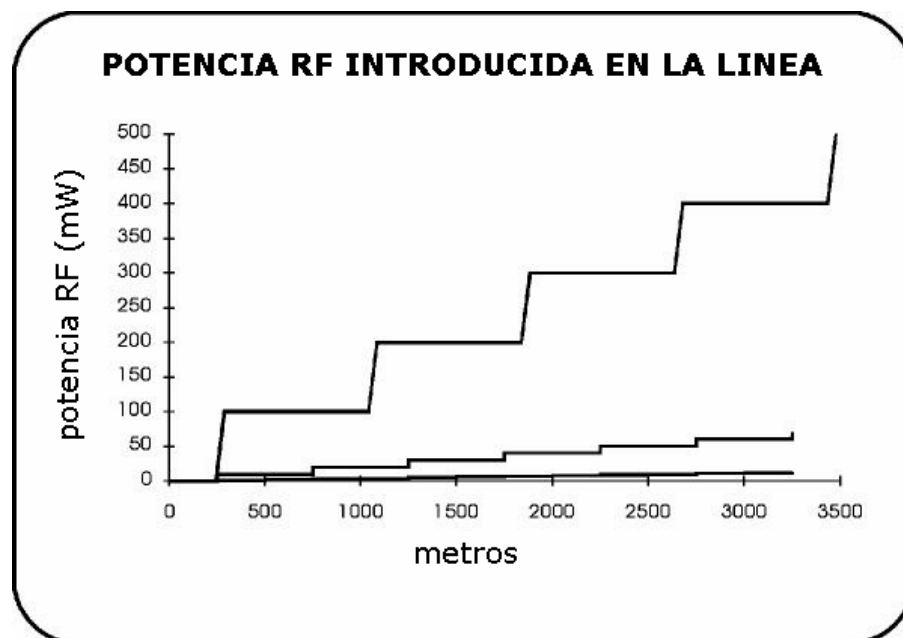


Figura 4.5.- Potencia de Radio Frecuencia Introducida en la Línea. ¹

¹ Las figuras 4.1 a 4.12 fueron obtenidas en <http://www.drtec.com>

De la anterior discusión se puede concluir que la mejor solución es reducir la distancia entre los amplificadores para reducir la potencia manejada por el sistema entero. Esto es imposible por las siguientes razones:

- El costo de los amplificadores es virtualmente el mismo sin depender de la ganancia. Así el costo total del sistema sería demasiado alto.
- Una conexión larga en cascada de amplificadores selectivos causa una reducción en el ancho de banda en los amplificadores al final de la línea lo cual hace a los amplificadores del comienzo de la línea menos selectivos. El resultado final es el riesgo de distorsión por intermodulación.
- Una gran parte de la potencia usada por un amplificador secundario es manejada por sus circuitos de control y supervisión, así que la potencia total manejada por el sistema se incrementa proporcionalmente al número de amplificadores secundarios.

En la practica actual, los amplificadores secundarios son instalados a distancia de 250 y 500 metros.

Los siguientes son los posibles métodos para suministrar potencia a los amplificadores secundarios.

- El uso de potencia que es independiente del amplificador primario
- El uso de potencia que esta conectada en paralelo con el amplificador primario
- Suministrando potencia a los amplificadores secundarios en serie al amplificador primario.

Exceptuando por el primer caso, la potencia desde el amplificador primario puede ser enviada al cable usado para la transmisión de señales de radio-frecuencia o usando un cable separado.

4.3.2.1. El uso de potencia independiente del amplificador primario

En sistemas donde una fuente de corriente alterna de bajo voltaje está disponible (por ejemplo en túneles subterráneos), la solución más simple es incluir una fuente de poder AC/DC junto con el amplificador. Dado el bajo requerimiento de potencia, la fuente de poder puede ser incluida en el mismo alojamiento que contiene la circuitería de radio-frecuencia. Esta solución no necesita explicación adicional debido a que es muy simple.

4.3.2.2. El uso de potencia en paralelo con el amplificador primario

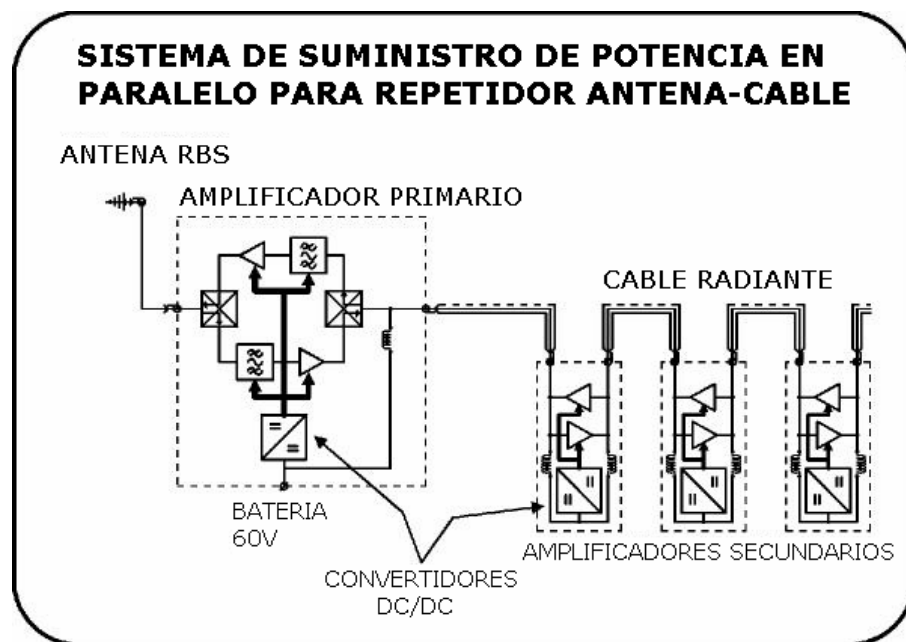


Figura 4.6.- Suministro de Potencia para Sistemas Remotos Antena-Cable.¹

La arquitectura de los amplificadores secundarios es mostrada en la figura 4.6. Un voltaje de 60V obtenido de una batería de plomo-ácido de 30 elementos puede ser utilizada para suministrar potencia a este tipo de amplificador.

Este voltaje es conectado en paralelo con el cable coaxial a través de una inductancia de desacoplamiento.

¹ Las figuras 4.1 a 4.12 fueron obtenidas en <http://www.drtec.com>

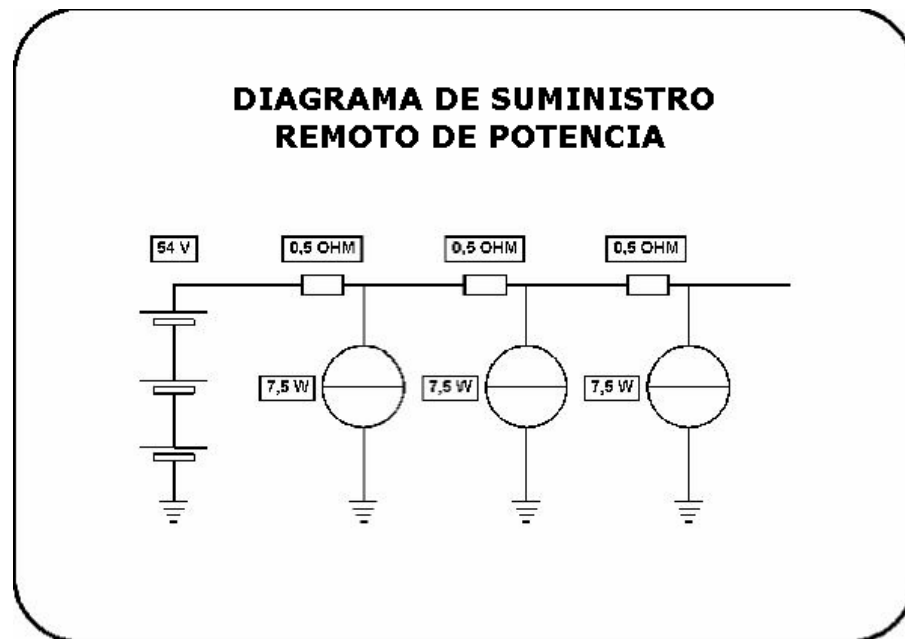


Figura 4.7.- Diagrama Esquemático para el Suministro Remoto de Potencia.¹

Cada amplificador secundario conectado en línea extrae potencia requerida para su operación (7.5 W) del lado de entrada de la línea a través de una inductancia de desacoplamiento. La misma potencia viaja a través de otra inductancia hacia el lado de salida de la línea para alimentar a los amplificadores subsiguientes. El diagrama esquemático para este sistema se muestra en la figura 4.7. Por simplicidad, las inductancias han sido omitidas puesto que no afectan la dinámica eléctrica del sistema.

¹ Las figuras 4.1 a 4.12 fueron obtenidas en <http://www.drtec.com>

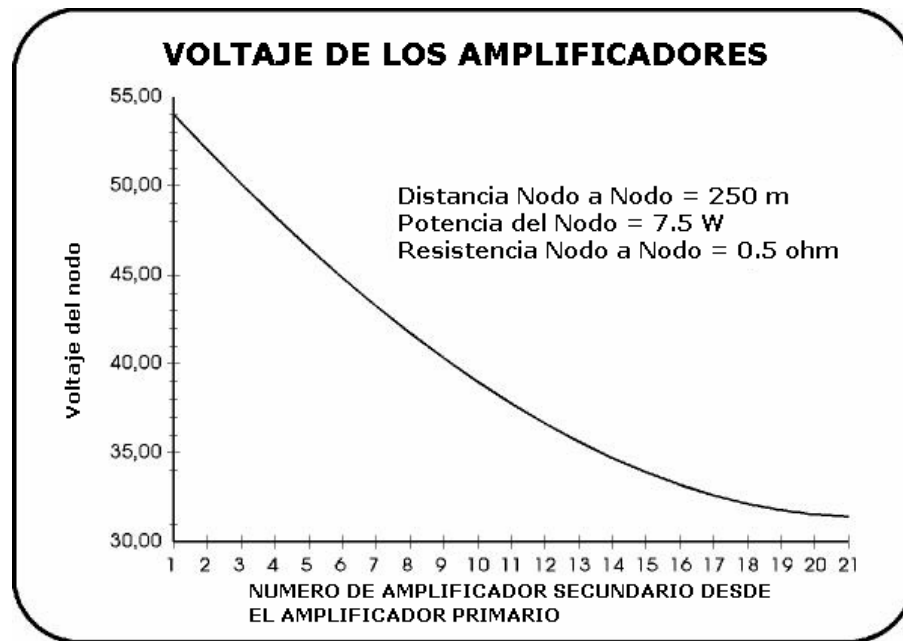


Figura 4.8.- Voltaje de los Amplificadores (línea principal = 250metros - Potencia del nodo = 7.5W - Voltaje = 54V).¹

El voltaje de la batería a ser considerado cuando calculamos la caída de voltaje a lo largo de la línea es el mínimo voltaje medido al final del ciclo de descarga de la batería (54V).

El diagrama de voltaje obtenido a lo largo de la línea es mostrado en la figura 4.8. La función relativa puede ser analíticamente expresada como una ecuación cuadrática con coeficientes constantes. Esta ecuación tiene dos soluciones; una solución es descartada puesto que indicaría consumo de potencia negativo (potencia suministrada).

En este sistema, el punto de inestabilidad al voltaje, consumo de potencia y resistencia establecidos es encontrado exactamente en el 22^o nodo, el

¹ Las figuras 4.1 a 4.12 fueron obtenidas en <http://www.drtec.com>

cual está localizado a aproximadamente 5500 metros del amplificador primario.

Para extender el campo de radio-frecuencia al grado requerido y para mantener un amplio margen de seguridad, es necesario trabajar con los siguientes parámetros cuando determinemos una solución:

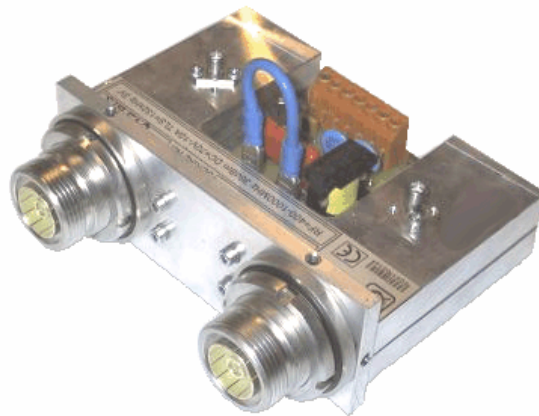
- Modificación de la Potencia manejada por los amplificadores
- Modificación de la resistencia de las secciones de línea entre los amplificadores
- Modificación del voltaje que alimenta el lado de entrada a la línea

Debido a las actuales limitaciones tecnológicas, los dos primeros parámetros no pueden ser cambiados. Como resultado el voltaje debería ser incrementado, o al menos debería ser mantenido estable cuando la batería descarga y así obtener curvas con una inflexión que es desplazada en al menos 4 o 5 secciones adicionales mas allá de las secciones activas de la línea.

Puesto que las regulaciones de seguridad limitan el voltaje sobre la línea de alimentación a un valor máximo de 72V, un convertidor-estabilizador DC/DC ha sido incluido. Esta unidad aplica un voltaje de salida estabilizado de 70V en el extremo de alimentación del cable coaxial radiante. La arquitectura obtenida de esta manera se muestra en la figura 4.9. El diagrama de voltaje obtenido a lo largo de la línea bajo estas condiciones se muestra en la figura 4.10.

La función representada en la figura presenta una inflexión en la 29^o sección, la cual está localizada aproximadamente a 7250 metros del extremo de alimentación del cable coaxial radiante. El uso de un convertidor DC/DC mejora el sistema de las siguientes maneras:

- La potencia manejada por el sistema secundario es reducida, puesto que la cantidad de corriente que circula a través del cable es reducida (aún cuando la misma cantidad de potencia es manejada por cada amplificador secundario), por lo tanto tenemos una consecuente reducción de pérdidas RI^2 .
- La corriente manejada si ocurre un cortocircuito en el cable es limitada por el regulador en el convertidor.
- Impedancias de cortocircuito incrementadas hacen más fácil diseñar los dispositivos que van a proteger contra sobrevoltajes.



Extractor-Inyector 15Amp DC - 400 MHz - 2 GHz (7/16 - SMA)

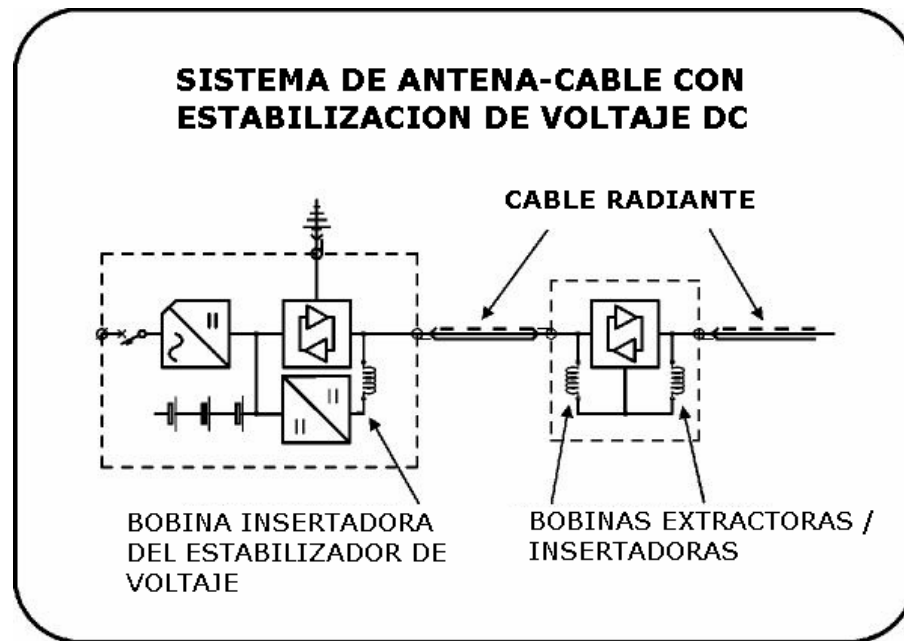


Figura 4.9.- Suministro de Potencia Remota con convertidor-estabilizador DC/DC. ¹

¹ Las figuras 4.1 a 4.12 fueron obtenidas en <http://www.drtec.com>

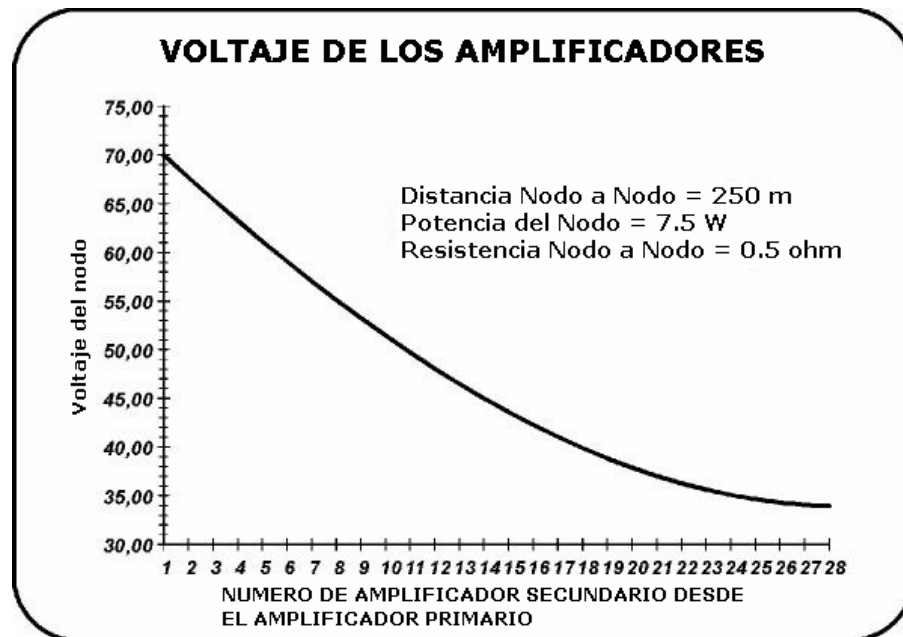


Figura 4.10.- Voltaje de los Amplificadores (línea principal = 250m - Voltaje = 70V).¹

En cualquier caso, por razones de márgenes de seguridad operacional y eficiencia del sistema, no es conveniente usar esta configuración sobre una distancia superior a 5000 metros. Cuando esta distancia es excedida, el voltaje suministrado a los amplificadores secundarios cae tan bajo que no pueden suministrar las altas corrientes que son requeridas, lo cual tiene un efecto negativo sobre el funcionamiento del sistema.

La instalación de un convertidor-estabilizador DC/DC mas allá de un divisor de radio-frecuencia, permitirá que el sistema de alimentación de potencia descrito arriba pueda ser también utilizado eficientemente en túneles dobles equipados con un doble cable coaxial radiante.

¹ Las figuras 4.1 a 4.12 fueron obtenidas en <http://www.drtec.com>

Si las secciones del túnel superiores a 5000 metros van a ser iluminadas, debe proveerse una estabilización de voltaje intermedio a lo largo de la sección a través del uso de uno o más convertidores del mismo tipo del que tenemos al inicio del cable.

La arquitectura así obtenida se muestra en la figura 4.11. Si se utiliza doble conversión de voltaje a lo largo de la línea, la longitud del cable radiante puede ser extendida a una distancia efectiva superior a 8500 metros. El diagrama de voltaje obtenido a lo largo de la línea bajo estas condiciones se muestra en la figura 4.12.

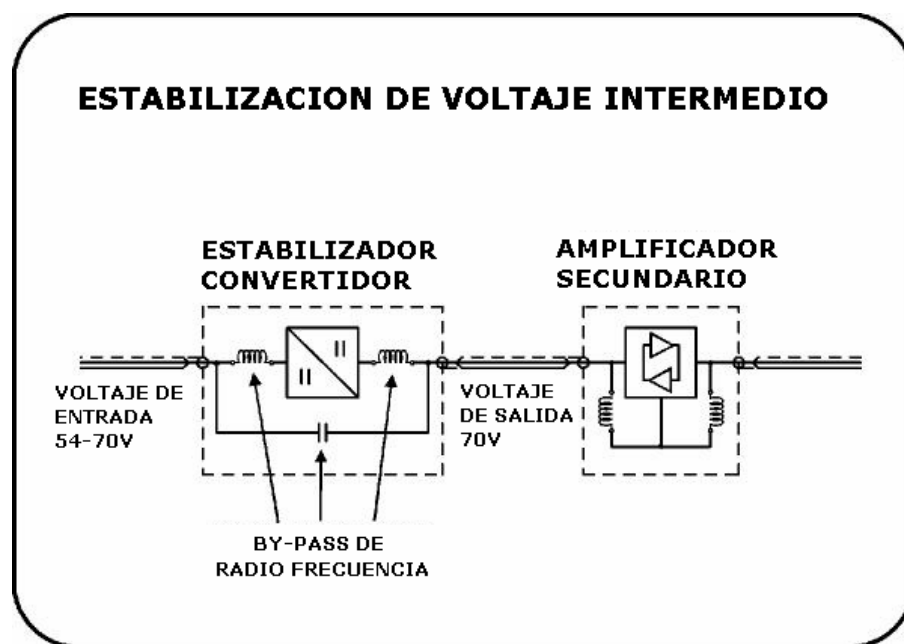


Figura 4.11.- Suministro Remoto de Potencia con Estabilización de Voltaje Intermedio. ¹

¹ Las figuras 4.1 a 4.12 fueron obtenidas en <http://www.drtec.com>

Como puede observarse en la figura 4.12, la inclusión de dos convertidores a lo largo de la línea provee una elección de 3 curvas con diferentes potencias de entrada. Un margen suficiente de estabilidad del sistema se mantiene en todos los casos. La inflexión de la primera curva está localizada aproximadamente en la 8^o sección, la inflexión en la segunda curva se encuentra en la 20^o sección, y la de la tercera curva en la 38^o sección. Operando al límite de la estabilidad del sistema, es teóricamente posible alcanzar una longitud de alrededor de 12000 metros. Sin embargo, por razones de eficiencia, confiabilidad y conveniencia, es recomendable limitar el sistema a no más de 35 secciones operativas teniendo una longitud total de 8750 metros.

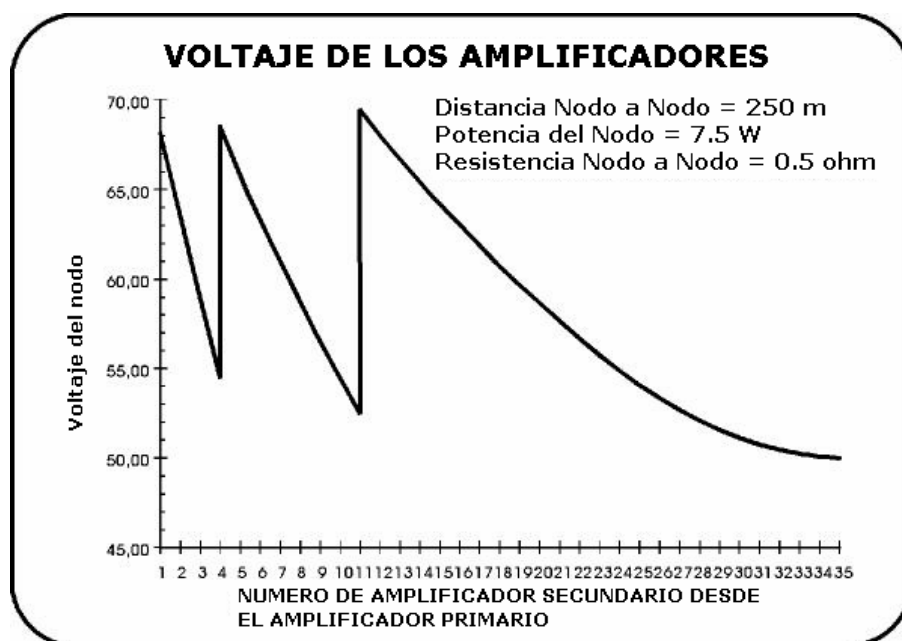


Figura 4.12.- Voltaje de los Amplificadores con dos Estabilizaciones.¹

¹ Las figuras 4.1 a 4.12 fueron obtenidas en <http://www.drtec.com>

De cualquier forma debe recordarse que las regulaciones europeas determinan un voltaje máximo de 120V (incluyendo cualquier rizado AC) para una fuente de poder DC segura. Como resultado incrementando el voltaje de alimentación sobre los amplificadores secundarios es posible extender fácilmente la línea a 15000 metros.

4.3.2.3. Suministrando potencia a los amplificadores secundarios en serie al amplificador primario

Otro método para suministrar potencia a los amplificadores secundarios es el llamado método "en serie". En este método, un banco de baterías suministra 60V a un convertidor DC/DC el cual introduce (a través de un inductor) una corriente directa en el cable coaxial de una manera similar al método de alimentación de potencia en paralelo con el amplificador primario.

Los convertidores instalados en los amplificadores secundarios (cuyas líneas de alimentación de potencia están conectadas en serie) transforman esta potencia en un voltaje apropiado para la circuitería del amplificador. Los convertidores así causan una caída de voltaje sobre el cable coaxial que es proporcional a la carga transferida.

Tomando en consideración la resistencia del cable coaxial, la carga transferida (aproximadamente 7.5W) y un voltaje máximo permitido por regulaciones de seguridad (72V), la corriente óptima para introducción dentro del cable esta alrededor de los 4 A y el número máximo de unidades amplificadoras no pueden exceder de 15.

Vamos a realizar una comparación entre alimentación de potencia en paralelo y alimentación de potencia en serie, así como también entre corriente directa y corriente alterna.

Para comparar correctamente los diferentes tipos de alimentación de potencia, es necesario primeramente considerar los límites de voltaje impuestos por la regulación europea EN 60439-1, los cuales son:

- Sistemas de clase 0: aquellos con un voltaje nominal menor o igual que 50V en corriente alterna, o 120V en corriente directa (no pulsante).
- Sistemas de clase 1: aquellos con un voltaje nominal de entre 50V y 1000V en corriente alterna o 120V a 1500V en corriente directa.

Cuando los sistemas de radio-frecuencia con antenas externas son utilizados, siempre es conveniente conectar un polo de la línea de alimentación de poder al circuito de tierra, así creando un sistema PELV (Protective Extra Low Voltage) cuyo bajo voltaje lo clasifica como sistema de clase 0.

El uso de un sistema PELV también elimina la necesidad de aterrizar las carcasas aisladas que contienen a los amplificadores secundarios dentro del túnel con el propósito de conseguir una protección efectiva contra contactos indirectos accidentales. Sin embargo, es importante recordar que durante el paso de un tren de alta velocidad manejando corrientes sobre los 5000 A, los potenciales de tierra a lo largo de la trayectoria pueden en muchos casos asumir diferencias de potencial de 2-3V/m. Así, cuando los amplificadores secundarios están colocados a intervalos de 250m, las diferencias de potencial con respecto a tierra pueden llegar a 500V. Cuando las carcasas de los amplificadores secundarios están aterrizadas,

se crean lazos de cortocircuito en el recubrimiento del cable coaxial, lo cual produce corrientes elevadas que circulan a través de los amplificadores y del cable coaxial. El uso de sistemas de clase 0 es conveniente y preferible, pero debe realizarse la elección de sistemas de alimentación de potencia en serie o en paralelo. Esta elección fundamentalmente depende de la longitud de la sección a ser iluminada. El límite de 15 unidades colocadas a distancias de 250m restringe el uso de sistemas en serie a túneles cuya longitud no excedan de 3500m, mientras que pueden lograrse longitudes superiores a 8500m con el sistema paralelo.

Por otro lado, el uso de corriente alterna en configuraciones paralelo o serie es definitivamente inconveniente, puesto que las regulaciones de seguridad limitan el voltaje máximo a 50V. En cualquier caso, debe considerarse que cuando la corriente alterna se usa en sistemas paralelos, es muy simple mantener el voltaje a lo largo de la línea virtualmente constante mediante la inclusión de un transformador elevador en cada unidad amplificadora secundaria; el transformador suministra potencia a la sección amplificadora y compensa por la caída de voltaje a lo largo de la línea, así el voltaje es mantenido constante.

Cuando los túneles miden mas de 8500m, es posible utilizar corriente alterna con un voltaje que exceda los 50V, pero solamente para suministrar potencia a los amplificadores secundarios y solamente si las siguientes condiciones se cumplen:

- El sistema no puede pertenecer a clase 0 sino más bien a clase 1. Como resultado, el amplificador secundario y el cable coaxial deben estar apropiadamente protegidos contra contactos accidentales directos e indirectos.

- Si el recubrimiento del cable coaxial debe estar aterrizado (generalmente, a la salida del túnel), el sistema no será considerado PELV sino más bien TN-C.
- La caída de voltaje debida a la alimentación de potencia que circula en el recubrimiento no debe exceder 50V.
- Únicamente personal especializado puede tener acceso a los amplificadores secundarios.
- Un switch de seguridad diferencial debe ser instalado para que todos los amplificadores se apaguen en caso de contacto accidental, directo o indirecto.

Debido a que este tipo de sistema es bastante complejo, debería ser utilizado solamente en casos muy especiales. Por ejemplo, un sistema de corriente directa paralelo puede ser usado para iluminar túneles sobre los 17000m mediante la instalación de dos amplificadores primarios (en ambas entradas del túnel), y dos sistemas secundarios, con cable coaxial radiante, donde cada sistema secundario tendrá una longitud máxima que no exceda los 8500m.

V. ESTUDIO PARA EL CASO DE LOS TÚNELES DEL CERRO DEL CARMEN

5.1 CARACTERÍSTICAS DEL CABLE RADIANTE A UTILIZARSE

Cuando se usa un cable radiante para proveer una cobertura con señal de radio dentro de túneles, en trenes subterráneos, en el interior de edificios, en minas, etc. el cable debe ser extremadamente confiable y diseñado para aguantar las demandas del ambiente de instalación.

NK Cables (USA) ha diseñado su serie de cables radiantes RFX usando el conocimiento adquirido por NK Cables en el desarrollo de cables alimentadores (feeder) de antena para estaciones base de redes celulares o móviles. Un buen ejemplo de este conocimiento es el proceso único del aislamiento del cable, en el que se usa nitrógeno como gas expansor. El alto grado de expansión del dieléctrico de espuma de polietileno y las aperturas escrupulosamente maquinadas a lo largo del conductor exterior garantizan una atenuación longitudinal mínima y una pérdida de acoplamiento también mínima.

Características Generales

- Atenuación y pérdida de acoplamiento bajos
- Buenas características a prueba de aplastes
- Cubierta disponible libre de halógeno y retardante al fuego
- Opción de cable mensajero para fácil instalación
- Dieléctrico de polietileno formado en una atmósfera de nitrógeno amigable al medio ambiente
- Capa de polietileno sobre el aislante de espuma para prevenir la entrada de humedad

Para mantener las excelentes características eléctricas del cable en condiciones húmedas, NK Cables suministra a sus cables radiantes una propiedad específicamente diseñada: una capa delgada sólida de polietileno encima de la espuma del dieléctrico, la cual constituye un sello efectivo en contra de la humedad. Este diseño especial del aislamiento mejora la vida de servicio y confiabilidad de los cables radiantes.

Hay dos tipos de conductor exterior disponibles:

- El conductor de cobre corrugado soldado se usa generalmente cuando se requiere flexibilidad y una buena durabilidad mecánica
- La banda de cobre traslapada no corrugada se usa en condiciones ambientales menos severas

Los cables que vayan a ser instalados en espacios cerrados deben cumplir especificaciones estrictas de retardantes al fuego, generación de humo y emisiones tóxicas. Se puede hacer la cubierta del cable con materiales retardantes de fuego y libres de halógeno, de acuerdo con los requisitos del cliente. Para mejorar aún más la capacidad retardante de fuego del cable,

está disponible la opción de una barrera de mica especial entre el conductor exterior y la cubierta exterior.

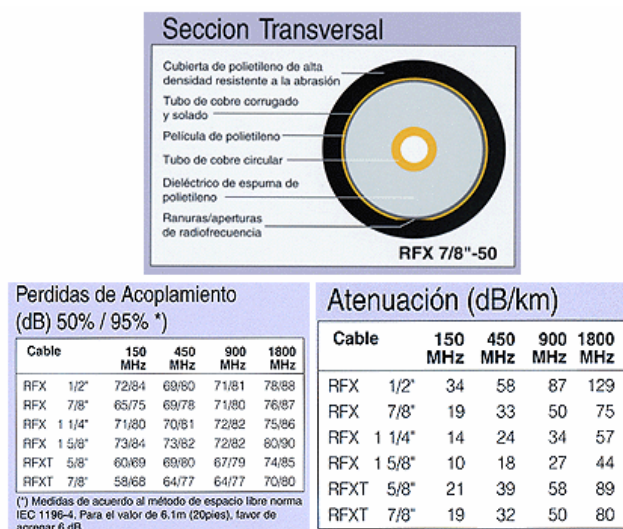


Figura 5.1.- Sección transversal del cable radiante fabricado por NK Cables (USA), junto con sus características de atenuación y pérdida de acoplamiento. ¹

¹ La figura 5.1 y la tabla 5.1 fueron obtenidas en <http://www.nkcablesusa.com>

| | RFX 1/2"-50 | RFX 7/8"-50 | RFX 1 1/4"-50 | RFX 1 5/8"-50 | RFX 2"-50 | RFX 2 1/2"-50 |
|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Construcción | | | | | | |
| Conductor interior | Alambre | Tubo | Tubo | Tubo | Tubo | Tubo |
| Cobre Circular | Ø 0.19in (4.8mm) | Ø 0.35in (9.0mm) | Ø 0.51in (13.0mm) | Ø 0.69in (17.5mm) | Ø 0.26in (6.7mm) | Ø 0.35in (9.0mm) |
| Dieléctrico Polietileno celular | Ø 0.48in (12.1mm) | Ø 0.87in (22.2mm) | Ø 1.27in (32.2mm) | Ø 1.65in (41.0mm) | Ø 0.68in (17.3mm) | Ø 0.91in (23.2mm) |
| Conductor exterior. Tubo corrugado, ranurado y soldado de cobre | Ø 0.54in (13.6mm) | Ø 0.98in (24.9mm) | Ø 1.41in (35.6mm) | Ø 1.83in (46.5mm) | - | - |
| Cinta de cobre sobrepuesta | - | - | - | - | Ø 0.69in (17.6mm) | Ø 0.92in (23.5mm) |
| Prevención a fuego. Aislante de barrera de mica | - | - | - | - | Ø 0.70in (17.8mm) | Ø 0.93in (23.7 mm) |
| Cubierta. Polietileno negro o termoplástico libre de halógeno | Ø 0.63 in (16.0mm) | Ø 1.08in (27.5mm) | Ø 1.54in (39.0mm) | Ø 1.97in (50.0mm) | Ø 0.87in (22.0mm) | Ø 1.13in (28.7mm) |
| Características Eléctricas | | | | | | |
| Impedancia | 50 ± 2Ω | 50 ± 2Ω | 50 ± 2Ω | 50 ± 2Ω | 50 ± 2Ω | 50 ± 2Ω |
| Atenuación | véase gráfica | Véase gráfica | véase gráfica | véase gráfica | véase gráfica | véase gráfica |
| Pérdida de Acoplamiento | véase gráfica | Véase gráfica | véase gráfica | véase gráfica | véase gráfica | véase gráfica |
| Factor de Velocidad | 0.88 | 0.88 | 0.87 | 0.87 | 0.88 | 0.88 |
| Capacitancia | 23 pF/ft (76 pF/m) | 23 pF/ft (76 pF/m) | 23 pF/ft (76 pF/m) | 23 pF/ft (76 pF/m) | 23 pF/ft (76 pF/m) | 23 pF/ft (76 pF/m) |
| Características Mecánicas | | | | | | |
| Peso | 0.24 lb/ft (350kg/km) | 0.37 lb/ft (550kg/km) | 0.67 lb/ft (900kg/km) | 0.90 lb/ft (1330kg/km) | 0.32 lb/ft (470kg/km) | 0.50lb/ft (750kg/km) |
| Rango operativo de temperatura | -40..158°F (-40..70°C) | -40..158°F (-40..70°C) | -40..158°F (-40..70°C) | -40..158°F (-40..70°C) | -40..158°F (-40..70°C) | -40..158°F (-40..70°C) |
| Fuerza de jalado máxima | 220 lb (1000N) | 400 lb (1800N) | 560 lb (2500N) | 670 lb (3000N) | 340 lb (1500N) | 520 lb (2330N) |
| Radio de dobléz mínimo | 5 in (125mm) | 10 in (250mm) | 15 in (380mm) | 20 in (510mm) | 14 in (350mm) | 16 in (400mm) |

Tabla 5.1.- Construcción, características eléctricas y mecánicas de los cables radiantes fabricados por NK Cables (USA).¹

5.2 SOLUCIÓN UTILIZANDO CABLE RADIANTE

La cobertura celular para ambos túneles se provee utilizando una señal de radiofrecuencia a través de una unidad repetidora, una por cada túnel, cuya

¹ La figura 5.1 y la tabla 5.1 fueron obtenidas en <http://www.nkcablesusa.com>

función es realizar el enlace con la estación base más cercana. La unidad repetidora se ubica en una de las entradas del túnel, debidamente alimentada y acoplada al cable radiante utilizando un cable coaxial.

La unidad repetidora contiene una antena yagui con 4 o 5 directores y un amplificador bi-direccional. La antena es de diseño simple, debe proveer una buena ganancia, buen aislamiento, además de ser suficientemente direccional para que no reciba las otras bandas de la estación base.



Figura 5.2.- Antena Yagi para aplicaciones en Túneles.

Como antena se utilizará una Antena Yagi para aplicaciones en Túneles en frecuencias de 800-900 MHz, fabricada por Sigma Wireless Technologies¹, cuyo código es STAN15W850, ver figura 5.2, esta antena permite polarización vertical u horizontal, el rango de antenas yagi STAN está diseñado para cobertura a lo largo de túneles o donde se requiera cobertura direccional. Estas antenas son particularmente convenientes para aplicaciones con repetidores y para extender las señales externas hacia los interiores. Los elementos eléctricos están puestos en un substrato

¹ www.sigmawireless.ie

de vidrio reforzado y encapsulados en un tubo de vidrio de poliéster elíptico delgado.

| | |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| ESPECIFICACIONES ELECTRICAS | STAN15W850 |
| Banda de Frecuencia | 800-900 Mhz |
| Ganancia | 14.5 dBi típica. |
| Pérdida de retorno | 14 db |
| Razón frontal/posterior | 15 db |
| Ancho del lóbulo en el plano H | 35 |
| Ancho del lóbulo en el plano E | 33 |
| Rango de potencia | 200 Watts |
| Impedancia | 50 Ohm |
| ESPECIFICACIONES MECANICAS | |
| Conectores | 7/16 DIN hembra |
| Dimensiones LxHxA | 1.3m x 0.10m x 0.16 approx. |
| Velocidad del viento máxima | 193 km/h |
| Montaje | Soporte integral con tornillos en U |
| MATERIALES | |
| Envoltorio | Entubado de vidrio poliéster |
| Soporte | Aleación de aluminio |
| Tornillos en U | Acero inoxidable |

Tabla 5.2.- Especificaciones Técnicas de la Antena Yagi STAN15W850.

Como amplificador se utilizará el ACE 1000 serie 651013-4414-201 fabricado por Andrew¹, es un amplificador bidireccional de banda-selectiva con control automático de ganancia (AGC) y trabaja en las bandas A y B de

¹ www.andrew.com

frecuencias asignadas para AMPS. Los amplificadores de la serie ACE 1000 son bidireccionales diseñados específicamente para extender la cobertura en interiores para sistemas celulares o troncalizados. Cada amplificador ACE provee 30-40 dB de ganancia en cada dirección. Un par ACE puede ser utilizado en una interface fuera del aire o uno simple en aplicaciones distribuidas con cables radiantes.

Los amplificadores ACE pueden ser usados como interface fuera del aire o como amplificadores de distribución de línea. Cuando son usados como interface fuera del aire conectando dos amplificadores ACE en cascada se proveerá una ganancia de 60-80 dB. Los amplificadores ACE son de tipo 1 y tipo 2. En el enlace de bajada los ACE de tipo 1 proveen pre-amplificación y los ACE de tipo 2 proveen amplificación de potencia. En el enlace de subida, ocurre lo opuesto, los de tipo 2 proveen pre-amplificación y los de tipo 1 proveen amplificación de potencia.



Figura 5.3.- Amplificador bidireccional ACE 1000.

Los amplificadores ACE de tipo 2 pueden ser también usados como amplificadores de distribución de línea para cobertura continua a lo largo de un cable radiante, o como alternativa a los amplificadores RADIAMP que

proveen una ganancia de 10-20 db, cuando se requiere una ganancia adicional mayor que 20 dB.

Los amplificadores ACE pueden ser provistos con una variedad de opciones, incluyendo control automático de ganancia y monitoreo remoto.

| DESCRIPCION | AMPS CELLULAR | | 900 MHZ/GSM | |
|----------------------|---------------|-----------|-------------|----------|
| | Downlink | Uplink | Downlink | Uplink |
| Frec. de Operación | 869-894 | 824-849 | 935-960 | 890-915 |
| Ganancia dB | 30-40 | 30-40 | 30-40 | 30-40 |
| Amplificador1 | | | | |
| IP ₃ , dB | +27 | +40 | +27 | +40 |
| CP ₁ , dB | +17 | +30 | +17 | +30 |
| Figura de Ruido dB | 10 | 10 | - | - |
| Amplificador 2 | | | | |
| IP ₃ , dB | +40 | +27 | +40 | +27 |
| CP ₁ , dB | +30 | +17 | +30 | +17 |
| Figura de Ruido dB | - | - | 10 | 10 |
| Rizado PasaBanda | < 4 dB | < 4 dB | < 4 dB | < 4 dB |
| VSWR | 2:1 | 2:1 | 2:1 | 2:1 |
| VoltajeVac,47-70Hz | 90-260 | 90-260 | 90-260 | 90-260 |
| PotenciaConsumida | 50W | 50W | 50W | 50W |
| Conectores RF | N- hembra | N- hembra | N- hembra | N-hembra |
| Rango de Temp. °C | -20 a 50 | -20 a 50 | -20 a 50 | -20 a 50 |

Tabla 5.3.- Especificaciones Técnicas de los amplificadores ACE 1000.

En la figura 5.4 se muestra un diagrama esquemático de la solución de cable radiante para el caso de los dos túneles del cerro del Carmen.

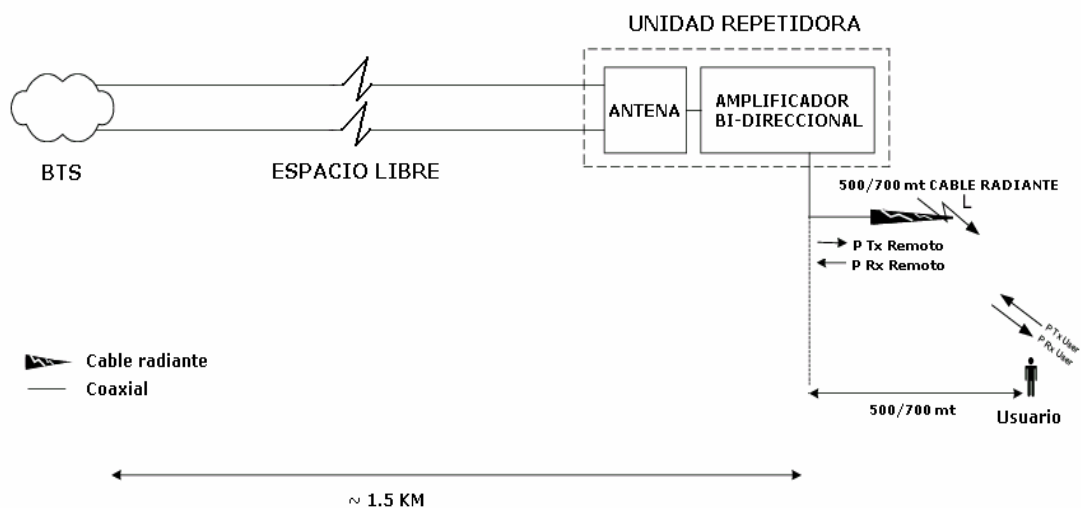


Figura 5.4.- Diagrama esquemático general para el caso de los dos túneles.

Para el ancho de banda de 800-900 Mhz, se puede utilizar un cable radiante de 7/8". Para el ancho de banda de 1800-2100 Mhz se necesitará un cable radiante de mayor diámetro (1-1/4") debido a la atenuación alta del cable de 7/8" para este rango de frecuencias.

Se utilizará el cable RFX 1-1/4" de NK Cables (USA), cuyas características especiales pueden observarse en la figura 5.1. Según la figura 5.1, este cable tiene una pérdida longitudinal de 34 dB/km (900 Mhz), y una pérdida por acoplamiento de 82 dB (95%).

Para el túnel de 540.50 mt. Tenemos una pérdida longitudinal máxima de $(34\text{dB/km}) \times (0.5405\text{km}) = 18.37 \text{ dB}$.

Para el túnel de 745.52 mt. La pérdida longitudinal máxima es de $(34\text{dB/km}) \times (0.74552\text{km}) = 25.34\text{ dB}$.

La pérdida máxima del sistema se daría en el túnel más largo, siendo de $25.34\text{ dB} + 82\text{ dB} = 107.34\text{ dB}$, un valor aceptable.

En la figura 5.5 podemos apreciar un esquema general para un repetidor antena-cable.

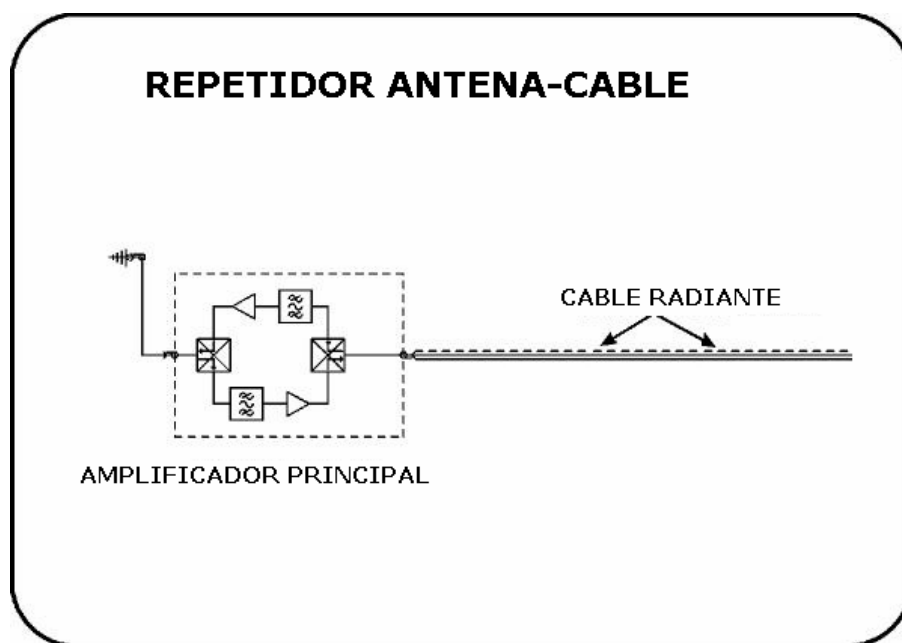
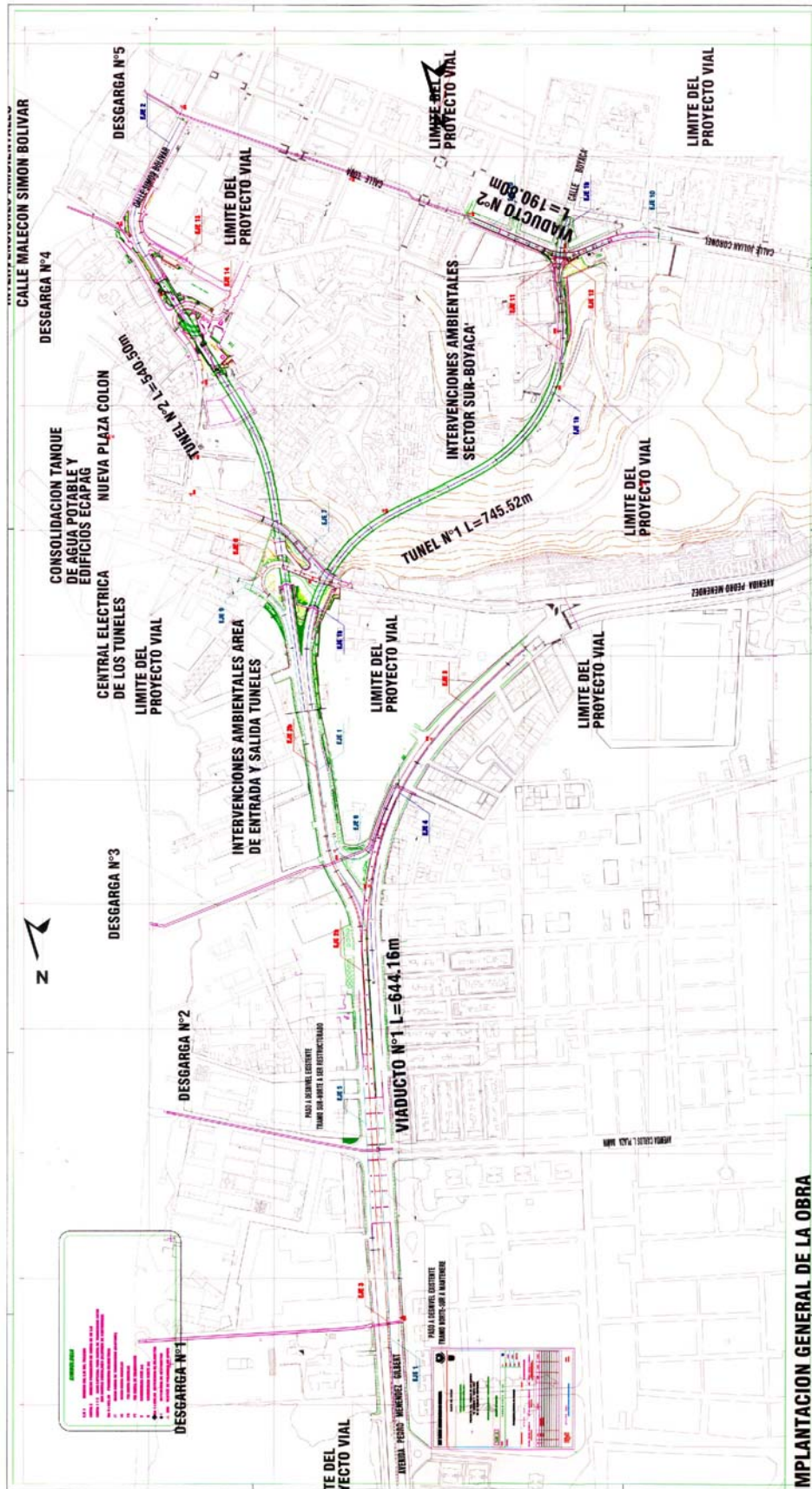


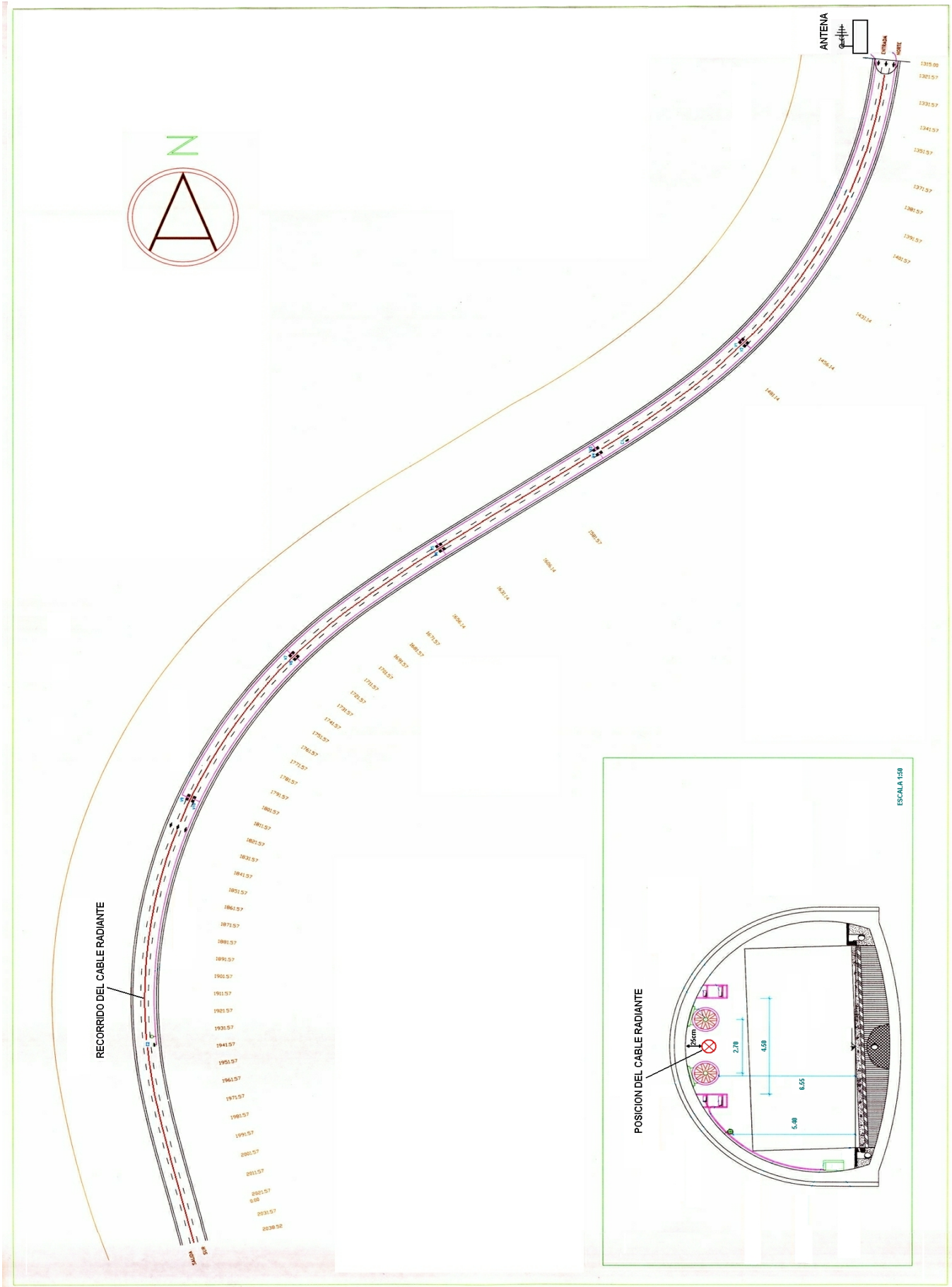
Figura 5.5.- Esquema simplificado del repetidor antena-cable utilizado.

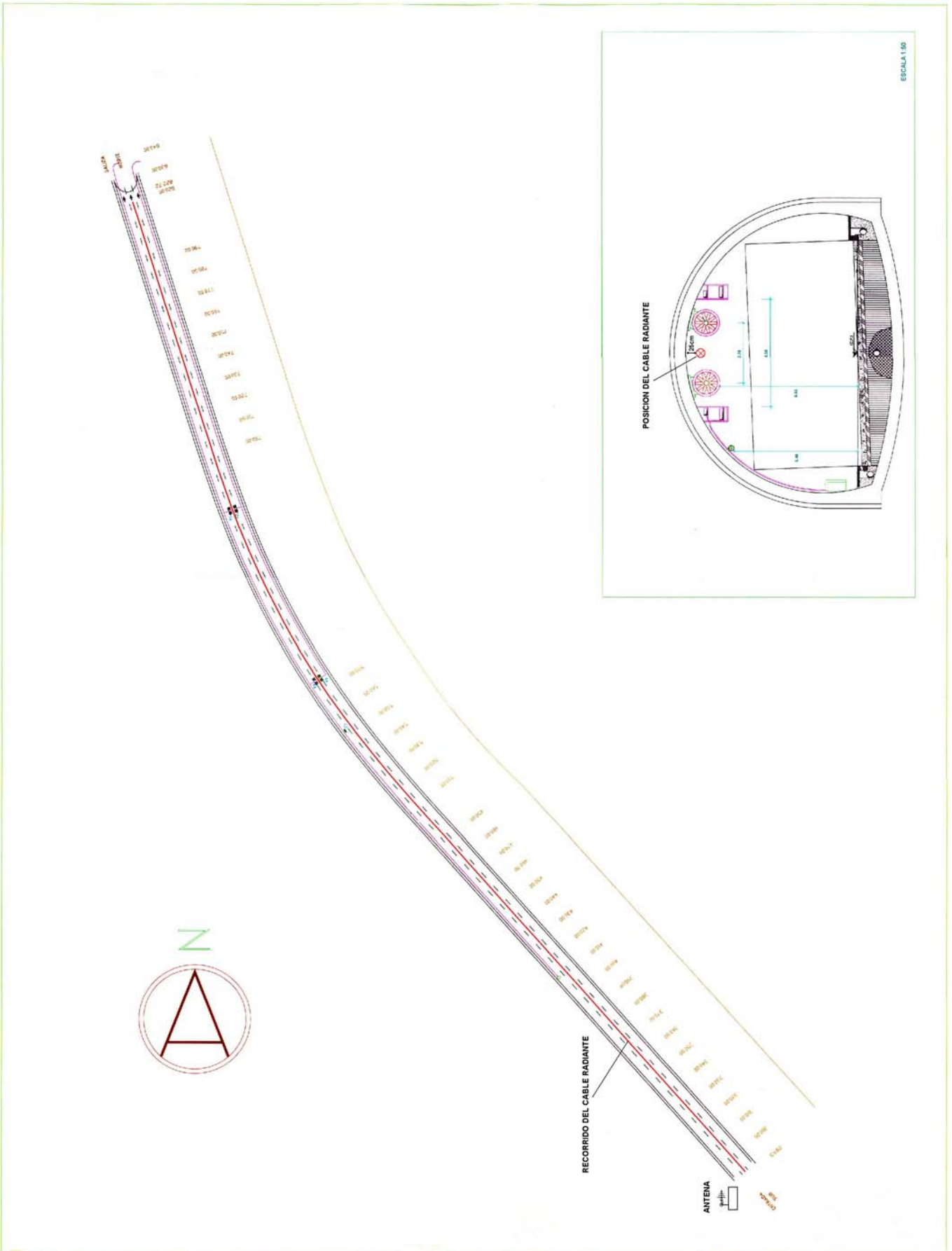
5.3 DIAGRAMA DE LOS TÚNELES Y RECORRIDO DEL CABLE RADIANTE

En la página siguiente se muestra un mapa general de los túneles, y en las dos siguientes el recorrido del cable radiante a través de los túneles, y la ubicación de la unidad repetidora.



IMPLANTACION GENERAL DE LA OBRA





5.4 FACTOR DE PERFIL PARA EL CABLE RADIANTE (RPF)

Recordemos del capítulo 3 que el factor de perfil para el cable radiante (RPF) está definido como el cociente entre el área de cobertura en pies cuadrados y la longitud necesaria de cable radiante.

Este cálculo será realizado para cada túnel.

Túnel 1:

$$\text{RPF1} = (\text{Área del túnel 1}) / (\text{Longitud del cable en el túnel 1})$$

$$\text{RPF1} = (\text{Área del túnel 1}) / (\text{Longitud del túnel 1})$$

$$\text{RPF1} = \text{Ancho del túnel 1} = 10 \text{ mt} = 32.8 \text{ pies.}$$

Túnel 2:

$$\text{RPF2} = (\text{Área del túnel 2}) / (\text{Longitud del cable en el túnel 2})$$

$$\text{RPF2} = (\text{Área del túnel 2}) / (\text{Longitud del túnel 2})$$

$$\text{RPF2} = \text{Ancho del túnel 2} = 10 \text{ mt} = 32.8 \text{ pies.}$$

Según el capítulo 3, se logra una buena cobertura con un factor de perfil de 150 o menos. Con el valor de 32.8 calculado está asegurada una buena cobertura, al ser mucho menor que 150, y podría abastecerse a un túnel de mayor diámetro si se requiriera.

5.5 EVALUACIÓN DEL COSTO

La longitud total requerida de cable radiante es igual a la suma de las longitudes de los dos túneles:

$$540.50 + 745.52 = 1286.02 \text{ mt} = 4218.15 \text{ pies.}$$

| Tabla 5.1 Costo de la instalación | | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|-------------|--------------|
| 4218' | Cable Radiante (1-1/4") | \$ 5.95/pie | \$ 25,097.10 |
| 10 | Uniones de cable | \$ 0.25 cu | \$ 2.50 |
| 2 | Conectores tipo N | \$100.00 cu | \$ 200.00 |
| 2 | Terminadores tipo N (opcional) | \$ 25.00 cu | \$ 50.00 |
| 1 | Jumper coaxial 60' | \$150.00 cu | \$ 150.00 |
| 4 | Tiras de aterrizaje | \$ 15.00 cu | \$ 60.00 |
| 130 | Abrazaderas | \$ 1.00 cu | \$ 130.00 |
| 2 | Antenas tipo Yagui | \$ 50.00 cu | \$ 100.00 |
| 2 | Amplificadores bi-direccionales | \$300,00 cu | \$ 600.00 |
| Costo total de materiales | | | \$ 26,389.60 |
| Instalación: | | | |
| 2 | Contratistas eléctricos | \$320/día | \$ 960 |
| | Arrendamiento equipo misc. | \$250 | \$ 250 |
| Costo total de labor | | | \$ 1,210 |
| Costo total del trabajo | | | \$ 27,599.60 |

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Hemos optado por la solución de cable radiante por la mayor confiabilidad que ofrece este medio en comparación con una solución basada en antenas, además de su fácil instalación y mantenimiento, gran ancho de banda que permite su utilización para servicios múltiples en telefonía móvil,

La adaptabilidad de este sistema frente al surgimiento de los nuevos servicios justifican su mayor costo. Las dos operadoras actuales pueden compartir los gastos de cable radiante, lo que disminuiría considerablemente el costo individual por cada compañía.

Según los cálculos de pérdidas realizados en la sección 5.2 del capítulo 5, no se requerirían repetidores secundarios dentro de cada túnel, la ganancia necesaria se puede ajustar en los amplificadores primarios que están en las entradas de los túneles, uno por cada túnel, para obtener un óptimo rendimiento del sistema.

El cable a instalar debe ser de excelente calidad previendo servicios futuros que requieran aplicaciones que demanden un gran ancho de banda. El uso de cable radiante nos asegura una comunicación sin interrupciones incluso en condiciones críticas .

Según hemos anotado la señal en las comunicaciones móviles en circunstancias especiales como en edificios y túneles es muy sensible a diferentes aspectos y en el caso nuestro analizado quizá hubiese sido más lógico incluso por costos utilizar antenas direccionales apuntando al lado de sombra de la señal, pero esta opción no nos aseguraba el control de factores como la reflexión de la señal, desvanecimiento, distribución uniforme de la potencia, que son aspectos técnicos que son necesarios evaluar profundamente al momento de seleccionar una alternativa de implementación técnica, como el caso que nos ocupa. La distribución uniforme de la potencia hace que se requiera un menor rango dinámico en los amplificadores a utilizarse, simplificando el diseño del sistema.

El cable debe ir a 20 o 25 centímetros del techo para minimizar las pérdidas en el enlace, asegurándonos además que los efectos de absorción de la señal en el material de concreto sea mínimo y no afecte a la potencia de la señal. Por teoría se sabe que hay una pérdida aproximada de 5 dB en el nivel de potencia cuando la ubicación del cable es muy cercana al concreto.

Hemos elegido un amplificador que opera solamente en un rango de frecuencia (800 – 900 Mhz), los amplificadores selectivos son los que mejores parámetros y características de operación poseen, tal cual se observa en la descripción de los mismos (Cap.5).

Si se desea operar en otros rangos de frecuencia únicamente tenemos que agregar el respectivo amplificador ya que el medio de transmisión de la señal, en este caso el cable radiante debe ser compartido por las diferentes operadoras, para lo cual se usa un combinador multibanda.

El modelo de amplificador con control automático de ganancia que se ha considerado va a compensar las variaciones en el nivel de potencia de la señal producidas por fenómenos naturales.

En cada túnel debe ubicarse la antena en la entrada por donde ingresan los vehículos para asegurar que se realice correctamente el handover, si se coloca la antena en la entrada opuesta el handover se realizaría demasiado tarde, debido al decrecimiento exponencial de la potencia de la señal.

Finalmente, es necesario acotar que el estudio de este enlace no es excesivamente complicado, dado que las condiciones han sido sumamente favorables, el riesgo de hacer una re-instalación es muy reducido. La relación costo-beneficio es muy aceptable, teniendo en cuenta que la calidad del servicio es superior, redundando en beneficio del usuario.

BIBLIOGRAFIA

a) Libro con edición

1. Theodore S. Rappaport, Wireless Communications: Principles and Practice (Prentice Hall, 2nd Edition), capítulo 3.

b) Artículo de Internet

2. H.-D. Hettstedt, B. Herbig, C. Spinner, H. Fischer, K. Schulze-Buxloh, "Indoor RF Coverage using Radiating Cables", (Radio Frequency Systems Inc., <http://www.rfs.de>, 2001).

c) Artículo de Internet.

3. DR Technologie, "Telecom and Cellular Telephony Products", (<http://www.drtec.com>, 2001)

d) Artículo de Publicación Periódica

4. Paul Delogne, "EM Propagation in Tunnels", (IEEE Transactions on Antenna and Propagation, vol. 39, num.3, Marzo 1991).

e) Artículo de Publicación Periódica

5. Jun Hong Wang, Kenneth K. Mei, "Theory and Analysis of Leaky Coaxial Cables With Periodic Slots", (IEEE Transactions on Antena and Propagation, vol. 49, num.12, Diciembre 2001).

f) Artículo de Internet.

6. Andrew Corporation, "The Evolution and Impact of New Wireless Communications Technologies on Mass Transit Railway Systems", (<http://www.andrew.com>, 1996).