



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN**

**“DISEÑO DE UN SISTEMA DISTRIBUIDO DE ANTENAS CELULARES  
PARA EL TUNEL DEL CERRO EL CARMEN DE GUAYAQUIL  
UTILIZANDO CABLE SCTP CAT 5/6 PARA LA BANDA GSM 850 MHZ”**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

**Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

Presentado por

Giovanni Gabriel Campodónico Durango

Guayaquil - Ecuador

2009

# AGRADECIMIENTO

Sobre todas las cosas agradezco a DIOS quién es mi inspiración, y me ha dado la vida, la salud, la sabiduría y la fuerza para culminar con éxito esta etapa importante de mi vida.

A mis padres por su amor infinito e incondicional, cariño, comprensión y constante apoyo durante toda mi vida y en especial en mi carrera universitaria.

Mi eterna gratitud a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL por acogerme durante estos años de estudio, y a todos los profesores por sus enseñanzas y aportes en mi formación profesional.

Un agradecimiento de manera especial al director de esta tesis, Ing. Pedro Vargas, por brindarme su apoyo, ayuda y colaboración.

# **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico a DIOS, a mis padres a quienes amo con todo mi corazón, a mi querido hermano, a mis apreciados amigos y a todas las personas que de alguna manera colaboraron en la realización de este proyecto.

# TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

---

Ing. Holger Cevallos

**Presidente del Tribunal**

---

Ing. Pedro Vargas

**Director de Tesis**

---

Dr. Boris Ramos

**Miembro del Tribunal**

---

Ing. Washington Medina

**Miembro del Tribunal**

# DECLARACIÓN 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”. (Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL)

---

Giovanni Gabriel Campodónico Durango

## RESUMEN

El proyecto ha exponerse, presenta el diseño de un sistema distribuido de antenas basado en cable UTP (Par trenzado) para el túnel del cerro El Carmen de la ciudad de Guayaquil, cuya longitud es de 800 metros.

En el primer capítulo, se realiza una breve introducción a la telefonía celular, revisando la historia de las comunicaciones inalámbricas, las generaciones de la telefonía móvil y se describen los elementos que utiliza un sistema de comunicación celular GSM.

El segundo capítulo, se refiere a las generalidades básicas de los sistemas distribuidos de antenas; los diferentes tipos de soluciones indoor, la clasificación de los DAS y una breve descripción de las características de propagación.

El tercer capítulo, contiene los criterios de implementación de un proyecto de esta clase, las consideraciones en el diseño y sus requerimientos; así mismo

las pruebas realizadas en el campo (Túnel) con un equipo (Antena y transmisor) que sustenta el diseño propuesto.

En el cuarto capítulo, se encuentra el estudio económico para la implementación del diseño propuesto.

Se finaliza con las conclusiones y recomendaciones de todo el trabajo, así como la Bibliografía y Anexos.

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	VI
ÍNDICE GENERAL .....	VIII
ABREVIATURAS .....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XVI
ÍNDICE DE TABLAS .....	XVIII
INTRODUCCIÓN .....	1

### **CAPÍTULO 1**

#### **INTRODUCCIÓN A LA TELEFONÍA CELULAR Y EL ESTÁNDAR**

<b>GSM .....</b>	<b>3</b>
------------------	----------

1.1 Historia de las comunicaciones inalámbricas .....	3
1.2 Generaciones de la telefonía móvil .....	9
1.2.1 La primera generación de la telefonía móvil .....	9
1.2.2 La segunda generación de la telefonía móvil .....	10
1.2.3 Generación 2.5G de la telefonía móvil .....	11
1.2.4 La tercera generación de la telefonía móvil .....	12
1.3 Fundamentos de la telefonía celular .....	13
1.3.1 Topología de un sistema celular .....	15
1.3.2 Reutilización de frecuencias y división en celdas .....	17
1.3.3 Seguimiento .....	21
1.3.4 Traspaso .....	21
1.3.5 Itinerancia .....	22
1.3.6 Técnicas de acceso .....	22
1.3.6.1 FDMA .....	23
1.3.6.2 TDMA .....	23
1.3.6.3 CDMA .....	24
1.3.7 Operaciones dúplex .....	25
1.3.7.1 Dúplex por división en frecuencia (FDD) .....	26
1.3.7.2 Dúplex por división en el tiempo (TDD) .....	26
1.3.8 GSM (Global system for mobile communications) .....	27
1.3.8.1 Arquitectura de la red GSM .....	28
1.3.8.1.1 La estación móvil .....	29
1.3.8.1.2 Subsistema estación base .....	33
1.3.8.1.3 Subsistema de red .....	35
1.3.8.1.4 Subsistema de operación y mantenimiento .....	38
1.3.8.2 La interfaz de radio .....	40
1.3.8.3 Canales lógicos .....	42
1.3.8.3.1 Canales comunes .....	43
1.3.8.3.2 Canales dedicados .....	45
1.3.8.4 Servicios básicos .....	50
1.3.8.5 GPRS (General packet radio service) .....	51

1.3.8.5.1 Evolución de las tecnologías de datos en GSM.....	51
1.3.8.5.2 Arquitectura GPRS.....	52
1.3.8.5.3 Servicios GPRS.....	56

## **CAPÍTULO 2 GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DISTRIBUIDOS DE ANTENAS..... 57**

2.1 Introducción .....	57
2.2 Soluciones para interiores .....	59
2.2.1 Cobertura con macroceldas.....	60
2.2.2 Microceldas.....	61
2.2.3 Cobertura con repetidores .....	62
2.2.4 Sistema distribuido de antenas.....	64
2.3 Consideraciones iniciales de los sistemas distribuidos de antenas .....	68
2.3.1 Tipos de sistemas distribuidos de antenas.....	68
2.3.1.1 Sistemas distribuidos en base a cable coaxial.....	68
2.3.1.2 Sistemas distribuidos en base a cable radiante .....	69
2.3.1.3 Sistemas distribuidos en base a fibra óptica .....	70
2.3.1.4 Sistemas distribuidos en base a pares trenzados (Cable UTP) .....	71
2.3.2 Características de propagación de RF .....	72
2.3.2.1 Propagación al aire libre.....	74
2.3.2.2 Propagación en lugares cerrados.....	75
2.3.2.3 Predicciones .....	75
2.3.2.4 Predicción de RF para exteriores .....	76
2.3.2.5 Predicción de RF para interiores .....	77
2.3.2.6 Información de la edificación.....	78
2.3.2.7 Atenuación en las edificaciones .....	79
2.3.2.8 Características de propagación en túneles .....	83
2.3.3 Estudio del sitio (Site survey).....	86
2.3.4 Equipamiento .....	88
2.3.4.1 Equipo DAS .....	88
2.3.4.2 Repetidor celular .....	89
2.3.4.3 Antenas .....	90
2.3.4.4 Antena yagi.....	91
2.3.4.5 Antenas para interiores .....	91
2.3.4.6 Cable coaxial .....	94
2.3.4.7 Fibra óptica.....	95
2.3.4.8 Par trenzado .....	97
2.3.4.8.1 Categorías de los cables de pares trenzados .....	101
2.3.4.9 Divisores de potencia (Splitters y tappers).....	103
2.3.4.10 Conectores .....	104

<b>CAPÍTULO 3</b>	
<b>DISEÑO DEL SISTEMA .....</b>	<b>105</b>
3.1 Objetivos.....	105
3.2 Criterios de diseño.....	106
3.2.1 Características del túnel del cerro El Carmen de Guayaquil .....	106
3.2.2 Consideraciones en interiores .....	109
3.2.3 Consideraciones en exteriores .....	114
3.3 Diseño propuesto .....	116
3.3.1 Esquema general del sistema.....	117
3.3.2 Elementos del sistema.....	118
3.3.2.1 Sistema de distribución .....	118
3.3.2.2 Fuente de RF.....	119
3.3.2.3 Antenas de cobertura .....	121
3.3.3 Diagrama de conexión .....	121
3.3.4 Site survey en el túnel.....	123
3.4 Cálculo de nivel de señal.....	127
3.5 Pruebas de campo .....	129
3.6 Análisis y resultados.....	133
<b>CAPÍTULO 4</b>	
<b>ESTUDIO ECONÓMICO.....</b>	<b>136</b>
4.1 Consideraciones iniciales .....	136
4.2 Análisis FODA .....	137
4.3 Costos de personal.....	140
4.4 Costos de equipos y materiales .....	141
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
<b>ANEXOS</b>	
Anexo A.1: Antena omnidireccional	
Anexo A.2: Antena tipo panel	
Anexo B: Tráfico vehicular en el túnel del cerro El Carmen	
Anexo C: Fotos del túnel del cerro El Carmen	
Anexo D: Especificaciones técnicas de los elementos del DAS	
Anexo E: Fotos de pruebas de campo (Prueba de propagación) en el túnel del cerro El Carmen	
Anexo F: Cotizaciones	
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	

## ABREVIATURAS

1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
3GPP	Third Generation Partnership Project
<b>A</b>	
AGCH	Access Grant Channel
AMPS	Advanced Mobile Phone Service
ARFCN	Absolute Radio Frequency Channel Number
ARIB	Asociación de Industrias de la Radio y Radiodifusión
AT&T	American Telephone and Telegraph
ATIS	The Alliance for Telecommunications Industry Solutions
AuC	Authentication Center
<b>B</b>	
Bps	Bits por Segundo
BCCH	Broadcast Control Channel
BDA	Bi-Directional Amplifier
BS	Base Station
BSC	Base Station Controller
BSIC	Base Station Identification Code
BSS	Base Station Subsystem
BTS	Base Transceiver Station
<b>C</b>	
C-Netz	Radio Telephone Network C (En alemán: Funktelefonnetz-C, abreviado como C-Netz)
CBCH	Cell Broadcast Channel
CCCH	Common Control Channel
CCITT	Consultative Committee for International Telegraphy and Telephony - Comité Consultivo Internacional Telegráfico y Telefónico
CCSA	China Communications Standards Association
CDMA	Code Division Multiple Access
CDR	Call Detail Records
CEPT	Conférence Européenne des Administrations des Postes et Telecommunications.
<b>D</b>	
D-AMPS	Digital AMPS
DAS	Distributed Antenna Systems – Sistema de Antenas Distribuidas
dB	Decibel

DCCH	Dedicated Control Channel
DL	Down Link
DPLM	Domestic Public Land Mobile
DRX	Discontinuous Reception
DTX	Discontinuous Transmission
<b>E</b>	
EB	Estación Base
EDGE	Enhanced Data Rate for GSM Evolution
EGPRS	Enhanced General Packet Radio System
EIA	Electronic Industries Alliance
EIR	Equipment Identity Register
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
<b>F</b>	
FACCH	Fast Associated Control Channel
FCC	Federal Communications Commission
FCCH	Frequency Correction Channel
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FER	Frame Error Rate
FH	Frequency Hopping
FM	Frequency Modulation
FPLMTS	Future Public Land Mobile Telecommunications System
FR	Full Rate
FTP	Foiled Twisted Pair
<b>G</b>	
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GPRS	General Packet Radio Services
GPS	Global Positioning System
GSM	Groupe Speciale Mobile
GSM	Global System for Mobile Communications
GSN	GPRS Support Node
<b>H</b>	
HLR	Home Location Register
HO	Handover
HR	Half Rate
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access

<b>I</b>	
IEC	International Electrotechnical Commission
IETF	Internet Engineering Task Force
IMEI	International Mobile Equipment Identity
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IMT-2000	International Mobile Telecommunications-2000
IMTS	Improve Mobile Telephone Service
IP	Internet Protocol
IS	Interim Standard
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISO	International Organization for Standardization
ISP	Internet Service Provider
ITU	International Telecommunication Union
ITU-T	ITU Telecommunication Standardization Sector
<b>L</b>	
LAC	Location Area Code
LAN	Local Area Network
<b>M</b>	
MoU	Memorandum of Understanding
ME	Mobile Equipment
MMC	Mobile Country Code
MNC	Mobile Network Code
MS	Mobile Station
MSIN	Mobile Station Identification Number
MSC	Mobile Switching Center
<b>N</b>	
NCH	Notification Channel
NMC	Network Management Center
NMS	Network Management Subsystem
NMT	Nordic Mobile Telephone
NSS	Network and Switching Subsystem
NTT	Nippon Telegraph and Telephone
<b>O</b>	
OMC	Operations and Maintenance Center
O&M	Operación y Mantenimiento
OSI	Open System Interconnection
OSS	Operation and Support Subsystem
<b>P</b>	
PCH	Paging Channel

PCS	Personal Communication Services
PCU	Packet Control Unit
PDN	Public Data Networks
PLMN	Public Land Mobile Network
PSTN	Public Switched Telephone Network
PTT	Postes, Telegraphes et Telephones of France

**Q**

QoS	Quality of Service
-----	--------------------

**R**

RACH	Random Access Channel
RADIOCOM	Sistema Celular Analógico Francés (Desarrollado por la PTT)
RAU	Remote Access Unit
RDSI	Red Digital de Servicios Integrados
RF	Radio Frecuencia
RG	Radiofrecuencia-Gobierno
RSSI	Radio Signal Strength Indicator
RTT	Radio Transmission Technology
Rx	Reception

**S**

S	Voz (Speech) a 13 kbps ó 6.5 Kbps
SACCH	Slow Associated Control Channel
SC	Straight Connection
SCDMA	Synchronous CDMA
SCH	Synchronization Channel
ScTP	Screened UTP. También FTP (Foiled Twisted Pair)
SDCCH	Stand alone Dedicated Control Channel
SGSN	Serving GPRS Support Node
SIM	GSM Subscriber Identity Module
SM-SC	Short Message Service Center
SMG	Special Mobile Group
SMS	Short Message Service
SS7	Signaling System Number 7
ST	Straight Tip
STP	Shielded Twisted Pair - FSTP (Foiled Shielded Twisted Pair)

**T**

TA	Timing Advance
TCH	Traffic Channel
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TE	Terminal Equipment

TIA	Telecommunication Industry Association
TMSI	Temporary Mobile Subscriber Identity
TP	Twisted Pair
TRAU	Transcoder/Rate Adapter Unit
TRX	Transceiver
TS	Timeslot
TTA	Telecommunications Technology Association
TTC	The Telecommunication Technology Committee
Tx	Transmission

**U**

UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UIT-R	UIT - Sector de Radiocomunicaciones
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UL	Uplink
UTP	Unshielded Twisted Pair

**V**

VAD	Voice Activity Detection
VoIP	Voice over IP
VLR	Visitors Location Register

**W**

WAP	Wireless Application Protocol
WCDMA	Wideband CDMA
WLAN	Wireless LAN

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.1 Elementos de la red celular
- Figura 1.2 La relación D/R
- Figura 1.3 División en celdas
- Figura 1.4 Traspaso (Handover)
- Figura 1.5 Técnica de acceso múltiple por división de frecuencia
- Figura 1.6 Técnica de acceso múltiple por división de tiempo
- Figura 1.7 Técnica de acceso múltiple por división de código
- Figura 1.8 Tecnologías de acceso
- Figura 1.9 Red GSM
- Figura 1.10 Arquitectura de la red GSM
- Figura 1.11 Teléfono GSM
- Figura 1.12 SIM card GSM
- Figura 1.13 Estación base GSM (ESPOL)
- Figura 1.14 Subsistema estación base
- Figura 1.15 Subsistema de red y conmutación
- Figura 1.16 Subsistema de operación y mantenimiento
- Figura 1.17 Tramas en el enlace de radio
- Figura 1.18 Canales de tráfico
- Figura 1.19 Red GSM/GPRS
- Figura 2.1 Cobertura desde una macrocelda
- Figura 2.2 Microcelda
- Figura 2.3 Cobertura en interiores con un repetidor
- Figura 2.4 Sistema distribuido de antenas
- Figura 2.5 Solución híbrida
- Figura 2.6 DAS con fibra óptica
- Figura 2.7 Cable coaxial
- Figura 2.8 Cables radiantes
- Figura 2.9 Fibra óptica
- Figura 2.10 Cables de pares trenzados
- Figura 2.11 Estación de tren con alta densidad de personas
- Figura 2.12 Equipo DAS
- Figura 2.13 Repetidor celular
- Figura 2.14 Antena yagi
- Figura 2.15 Antena omnidireccional y antena directiva
- Figura 2.16 Ubicación de antena omnidireccional en un área regular
- Figura 2.17 Ubicación sugerida de más de una antena
- Figura 2.18 Conectores para fibra óptica
- Figura 2.19 Cable STP
- Figura 2.20 Cable ScTP
- Figura 2.21 Divisores de potencia
- Figura 2.22 Conector tipo N
- Figura 3.1 Ingreso al túnel del cerro El Carmen

- Figura 3.2 Mapa de la ciudad de Guayaquil. Sector en donde se encuentran los túneles de los cerros El Carmen y Santa Ana
- Figura 3.3 Niveles de señal en el interior del túnel del cerro El Carmen.  
a) Movistar y Alegro b) Porta
- Figura 3.4 Mediciones de %FER en el interior del túnel del cerro El Carmen. a) Movistar y Alegro b) Porta
- Figura 3.5 Equipamiento de drive test TEMS (Ericsson)
- Figura 3.6 Niveles de señal en los exteriores del túnel del cerro El Carmen.  
a) Movistar y Alegro b) Porta
- Figura 3.7 Esquema general del sistema
- Figura 3.8 Accel Hub y RAU
- Figura 3.9 Repetidor usado como fuente de RF
- Figura 3.10 Antena omnidireccional montada en el cielo falso
- Figura 3.11 Diagrama de conexión del sistema de antenas distribuidas para el túnel del cerro El Carmen
- Figura 3.12 Estaciones bases mejores servidores al interior del túnel
- Figura 3.13 Fotomontaje del DAS propuesto
- Figura 3.14 Ubicaciones de los elementos
- Figura 3.15 Equipamiento transmisor
- Figura 3.16 Equipamiento receptor
- Figura 3.17 Niveles de señal estimados del DAS al interior del túnel del cerro El Carmen
- Figura 3.18 Niveles de señal estimados del DAS más la cobertura actual.  
a) Movistar y Alegro b) Porta

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla I	Valores promedio de atenuación
Tabla II	Costos de personal
Tabla III	Costos de equipos
Tabla IV	Costos de accesorios RF y materiales de instalación
Tabla V	Costos adicionales
Tabla VI	Resumen de costos

# INTRODUCCIÓN

La llegada de la telefonía celular ha revolucionado completamente el sector de las telecomunicaciones, ya que gracias a la *movilidad* se ha podido establecer la comunicación en cualquier momento y en cualquier lugar. En el Ecuador, el servicio de telefonía celular ha experimentado el vertiginoso desarrollo que existe desde hace ya algunas décadas en países desarrollados como Estados Unidos, Japón y España, y ha llegado a formar parte fundamental de nuestras actividades diarias, en particular el uso de la tecnología GSM, servicio que es ofrecido por las tres operadoras de telefonía celular del país, Porta, Alegro y Movistar, y con un mercado de más de diez millones de usuarios según datos de la superintendencia de telecomunicaciones.

Por otra parte, la calidad de la señal de los sistemas celulares es un tema fundamental cuando hablamos del servicio que una operadora ofrece. La calidad puede verse afectada por diversos factores y es necesario implementar soluciones que permitan solventar los inconvenientes que afectan el desempeño de la red celular. En esto precisamente se enfoca el

presente proyecto, en dar una solución efectiva y práctica al problema que representa garantizar la cobertura celular en la totalidad de un túnel, que dependiendo de su longitud y trazado no puede ser cubierto con las radiobases más cercanas.

El presente trabajo expone el diseño de un sistema distribuido de antenas, como una solución puntual para ofrecer cobertura continua, en el túnel del cerro El Carmen de la ciudad de Guayaquil. Dicho diseño puede ser utilizado por cualquiera de los operadores de telefonía celular que utilizan tecnología GSM en nuestro país. Al final se tienen conclusiones confiables y acordes a las consideraciones iniciales, presentando un desarrollo adecuado en cada capítulo para cumplir con el objetivo central del proyecto. Como resultado se producirá un documento que pueda contribuir para el despliegue de sistemas distribuidos de antenas en otros túneles del país.

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN A LA TELEFONÍA CELULAR Y EL ESTÁNDAR GSM**

### **1.1 Historia de las comunicaciones inalámbricas**

Desde su origen, el hombre es un ser sociable que se relaciona con sus semejantes mediante mensajes, que le han permitido establecer y organizar sus entornos natural, social y cultural. Durante mucho tiempo el alcance y la velocidad de las comunicaciones estuvieron limitados al desplazamiento del hombre, pero gracias al perfeccionamiento de los sistemas de comunicación a lo largo de la historia de la humanidad, ha sido posible la integración de las personas traspasando las barreras de la distancia [1].

Uno de los grandes logros de la humanidad ha sido el telégrafo y el teléfono, los exponentes más notables del desarrollo de la comunicación eléctrica con

un ritmo de crecimiento espectacular. Pero ni el impacto del telégrafo en las comunicaciones a mediados del siglo XIX, ni el rápido desarrollo del teléfono, pueden compararse con la revolución que ha causado la comunicación por ondas electromagnéticas (Radio), que permite la movilidad de los agentes de la comunicación, dando origen a las comunicaciones móviles, cuyo objetivo fundamental es satisfacer la necesidad del usuario de comunicarse en cualquier instante y lugar, sin importar si se encuentra en un lugar fijo o en movimiento.

Las comunicaciones móviles tuvieron un rápido crecimiento, principalmente debido al desarrollo de las comunicaciones vía radio en 1896, y a la aparición del transistor a partir del año 1947. Los primeros usos del radio móvil tuvieron relación con los sistemas de navegación aérea y marítima, así como también aplicaciones de tipo militar. Pero es con el desarrollo práctico de la tecnología celular durante la década de los setenta que las radiocomunicaciones móviles comienzan a desarrollarse intensamente, dando nacimiento a la telefonía móvil.

Los principios teóricos de la tecnología celular fueron establecidos por Douglas H. Ring cuando trabajaba en los Laboratorios Bell (Bell labs) de los Estados Unidos en el año 1947. Ring proponía utilizar una red de transmisores de baja potencia, instalados siguiendo un patrón de despliegue

hexagonal, de forma que la contribución de todos ellos permitiera cubrir toda el área de servicio; el concepto de reutilización de frecuencias con transmisores que estén lo suficientemente alejados para evitar interferencias; y el traspaso de llamadas entre transmisores como forma de garantizar la continuidad de una comunicación. La tecnología y el número de frecuencia necesarios para implementar este tipo de sistemas fue logrado en los años setenta por Amos Engel Joel, también de los Laboratorios Bell, y desde entonces el concepto celular, es decir, la reutilización de frecuencias, fue aceptado como una herramienta para la planificación de frecuencias [2].

A continuación se detallan los hechos históricos más relevantes en el desarrollo de las comunicaciones inalámbricas [3], [4] y [5].

- |      |                                                                                                                                    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1837 | Samuel Morse, inventa el telégrafo.                                                                                                |
| 1867 | Postulación de las Ondas Electromagnéticas por James Maxwell.                                                                      |
| 1876 | El teléfono es inventado por Alexander Graham Bell.                                                                                |
| 1887 | Heinrich Rudolph Hertz, demuestra la existencia de las ondas postuladas por Maxwell.                                               |
| 1896 | Transmisión telegráfica inalámbrica utilizando ondas de radio. Primera patente de los sistemas inalámbricos por Guglielmo Marconi. |

- 1906 Reginald Aubrey Fessenden, transmitió exitosamente voz humana sobre ondas de radio, anteriormente a esto todas las comunicaciones eran con código Morse.
- 1915 La invención del *Diodo* (Tubo al vacío) por John Ambrose Fleming en 1904, y del *Triodo* (Lee De Forest) en 1906, hizo posible mejorar las transmisiones a larga distancia (Radiotelefonía).
- 1928 El Departamento de Policía de Detroit instala por primera vez un radio móvil. La comunicación fue en un sentido.
- 1934 Mediante una resolución del Congreso de Estados Unidos, es creada la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC).
- 1940 La FCC clasifica a los servicios de radio como Domestic Public Land Mobile (DPLM).
- En Saint Louis, Missouri, AT&T (American Telephone and Telegraph) presenta al mercado el primer sistema comercial de telefonía móvil vehicular para el público (1946). El sistema funcionaba en la frecuencia de 150 MHz, utilizando 6 canales espaciados 60 KHz.
  - El siguiente año en New York-Boston se usó la banda de los 35-40 MHz.
- 1947 Douglas H. Ring, trabajando en los laboratorios Bell, crea el concepto celular. En el mismo año, los laboratorios Bell

inventaron el transistor y como consecuencia empieza el desarrollo de la electrónica de los semiconductores.

- 1964 AT&T introduce el sistema de telefonía móvil mejorada (IMTS).
- 1968 La FCC propone los nuevos requerimientos de espectro en los Estados Unidos.
- 1969 Los países nórdicos (Suecia, Finlandia, Noruega y Dinamarca) crean el primer grupo de estandarización internacional NMT (Nordic Mobile Telephone).
- 1973 El grupo nórdico de telefonía móvil especifica las características para que los móviles se puedan localizar a través de redes, formando las bases para la itinerancia.
- 1973 El Dr. Martín Cooper, realiza la primera llamada desde un teléfono celular.
- 1977 La FCC autoriza la instalación y pruebas del primer sistema experimental de telefonía celular en los Estados Unidos. AT&T realizó la inauguración del primer sistema AMPS (Advanced Mobile Phone Service) en Chicago. Generación de telefonía celular 1G.
- 1981 Ericsson desarrolla el sistema celular NMT (Basado en estándares NMT) en Arabia Saudita.
- 1982 La FCC autoriza el servicio comercial de telefonía celular en los Estados Unidos. La CEPT (Conférence Européenne des

- Administrations des Postes et Telecommunications) crea el Groupe Speciale Mobile (GSM).
- 1983 El sistema de telefonía móvil avanzado (AMPS), basado en la tecnología FDMA (Frequency Division Multiple Access), se inicia el 13 de octubre en Chicago.
- 1987 TDMA se selecciona como estándar para GSM. Trece países europeos firman el Memorandum of Understanding (MoU).
- 1990 Generación de telefonía celular 2G.
- 1991 Primera red GSM (Global System for Mobile Communications) es instalada en Europa.
- 1992 D-AMPS es implementado (TDMA IS-136).
- 1993 Primeros servicios comerciales GSM son lanzados.
- 1993 La Asociación de Industrias de Telecomunicaciones (TIA) aprobó el estándar CDMA-IS-95 (Code Division Multiple Access).
- 1996 La FCC autoriza la licencia para los servicios de comunicación personales (PCS) en los Estados Unidos.
- 1996 Bell Atlantic Mobile lanza la primera red comercial CDMA en los Estados Unidos.
- 1998 Creación del 3GPP (Third Generation Partnership Project), que contempla a los sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación (FPLMTS). La Unión Internacional de

Telecomunicaciones (ITU) lo denomina como IMT-2000 (Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000), comúnmente conocido como UMTS.

- 2001 70% de los usuarios de teléfonos móviles del mundo usan GSM.
- 2004 AT&T Wireless se convirtió en el primer operador en lanzar servicios UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) comercialmente en USA.

## **1.2 Generaciones de la telefonía móvil**

En las comunicaciones móviles las distintas necesidades y avances tecnológicos dieron lugar a fases bien diferenciadas, denominadas generaciones, que se detallan a continuación.

### **1.2.1 La primera generación de la telefonía móvil**

Esta primera generación estaba basada en tecnologías analógicas y especializada en transporte de voz, aunque mediante el uso de módems analógicos convencionales se podía conseguir la transmisión de datos a no más de 4800 bps; se caracteriza por soluciones propietarias desarrolladas por distintos fabricantes tales como Ericsson, AT&T o Motorola. En

Norteamérica a partir del año 1981 comenzó a utilizarse el sistema AMPS (Advanced Mobile Phone Service); Europa introduciría el mismo año el sistema NMT (Nordic Mobile Telephone System - NMTS450) el cual empezó a operar en Dinamarca, Suecia, Finlandia y Noruega, en la banda de los 450 MHz. En 1982, se comercializa el TMA-450 (Telefonía Móvil Automática), el primer sistema celular en España, derivado del estándar NMT. En 1985, Gran Bretaña, a partir de AMPS, adoptó el sistema TACS (Total Access Communications System), en esta década también aparecen otros sistemas de primera generación como el estándar que desarrolló la operadora japonesa de telefonía móvil NTT, el estándar Alemán C-Netz y French Radiocom 2000 de Francia [6].

### **1.2.2 La segunda generación de la telefonía móvil**

Esta generación se caracteriza por basarse en tecnología digital, diseñada para transmitir voz y datos con velocidades relativamente bajas (Desde 9,6 Kbps a 14,4 Kbps). Con tantos estándares diferentes, los proveedores europeos sufrieron las consecuencias de una diversidad de normas incompatibles entre sí. El reconocimiento de este problema fue un factor que impulsó el desarrollo del estándar GSM, que es la tecnología más importante 2G, que introdujo la digitalización total de la red y los terminales. Aunque con GSM en esta generación no se logró la introducción de los datos más que en

una pequeña medida (SMS), sí se lograron economías de escala asociadas a la mayor capacidad proporcionada por la tecnología y la adopción de la misma por un gran número de operadoras en todo el mundo [7].

A principios de la década de los 90, también aparecen otros estándares que pertenecen a la segunda generación. TDMA IS-136, también conocido como D-AMPS que es la evolución de AMPS; y CDMA (IS-95), desarrollado por Qualcomm, el cual consiste en que todos los usuarios usan la misma frecuencia y al mismo tiempo se separan las conversaciones mediante códigos.

### **1.2.3 Generación 2.5G de la telefonía móvil**

Como 2.5G se conoce a la tecnología que fue desarrollada para sobrepasar las limitantes de algunos sistemas en lo referente al envío de información; y es la generación que la mayoría de los proveedores de telefonía celular implementan antes de ingresar a redes 3G, de hecho, expertos en telecomunicaciones sostienen que el término “2.5G” fue inventado con fines publicitarios únicamente.

La tecnología 2.5G más conocida es GPRS (General Packet Radio Services). GPRS añade conmutación de paquetes de datos, realiza un uso más eficaz

de los recursos de la red alcanzando mayores tasas de datos (Hasta 171.2 Kbps, teóricos), conectividad permanente y pago por cantidad de información transmitida. La evolución de GPRS es EDGE (Enhanced Data Rate for GSM Evolution) (384 Kbps) que es básicamente el sistema GPRS con un nuevo esquema de modulación [6].

Mientras GPRS y EDGE se aplicaron a GSM, otras mejoras fueron orientadas al sistema CDMA, con CDMA-1xRTT<sup>1</sup>, con tasas de datos promedio de 144 Kbps. Aunque estos avances podrían ser clasificados como tercera generación, son considerados por la mayoría como 2.5G porque en la práctica son más lentos que los servicios implementados en una red 3G.

#### **1.2.4 La tercera generación de la telefonía móvil**

El objetivo de esta generación es proporcionar al usuario final la convergencia de los servicios de voz y datos con acceso inalámbrico a Internet, aplicaciones multimedia y que le permita acceder a los mismos servicios que proporcionan las redes fijas, gracias a mayores tasas de transmisión en la interfaz de radio (Desde 384 Kbps hasta 2Mbps).

---

<sup>1</sup> 1xRTT: Usado para indicar que el portador estándar en la interfaz de aire es de 1.25 MHz.

En un principio los sistemas 3G fueron denominados como Futuros Sistemas de Telecomunicaciones Móviles Terrestres Públicos (FPLMTS), sin embargo el significado de 3G fue “estandarizado” por la ITU con el proceso IMT-2000, el cual no estandariza una tecnología sino más bien establece una serie de requerimientos que deben cumplir los sistemas para ser considerados 3G. A pesar de que el IMT-2000 busca un sistema único global de telecomunicaciones, existe más de un estándar 3G: UMTS, CDMA2000 y en China TD-SCDMA (TDD con WCDMA).

El 3GPP es el principal foro de estandarización de un sistema móvil 3G. No tiene entidad legal, es un proyecto común de sus socios, y está formado por el ETSI (European Telecommunications Standards Institute), ATIS (The Alliance for Telecommunications Industry Solutions) de los Estados Unidos, ARIB (Asociación de Industrias de la Radio y Radiodifusión) y TTC (The Telecommunication Technology Committee) en Japón, TTA (Telecommunications Technology Association) de Corea y CCSA (China Communications Standards Association) de China [7].

### **1.3 Fundamentos de la telefonía celular**

Cuando se definió el sistema de telefonía celular se planteó realizar un sistema que no tuviera las falencias de los anteriores sistemas de

comunicación móviles vía radio, y cuyo objetivo principal fuese brindar el servicio a miles de usuarios haciendo un uso eficiente de un recurso limitado, el *espectro* [8].

Un sistema celular se forma al dividir el territorio al que se pretende dar servicio en células o celdas (De mayor o menor tamaño), cada una de las cuales es atendida por una estación de radio (Denominada comúnmente estación base) que restringe su zona de cobertura a la misma, aprovechando el alcance limitado de la propagación de las ondas radioeléctricas a frecuencias elevadas (Normalmente UHF entre 800 y 1900 MHz); así, el espectro de frecuencia puede volver a reutilizarse en cada nueva celda, siempre teniendo cuidado de evitar la interferencia entre celdas próximas. De esta manera se puede aumentar considerablemente el número de usuarios, al no requerir una frecuencia exclusiva para cada uno de ellos.

En conclusión, se puede establecer que el *concepto celular* se basa en la división de la zona de cobertura en regiones pequeñas, llamadas células, de tamaño variable en función de la demanda de tráfico; y en la reutilización de las frecuencias en células separadas por una distancia suficiente para que la interferencia cocanal sea tolerable.

### 1.3.1 Topología de un sistema celular

Los componentes principales de un sistema celular son [1], [8] y [9]:

a) **Las células o celdas:** Son las distintas áreas geográficas en las que se divide el área total que pretende cubrir el sistema. Corresponde a una zona cubierta por una estación base. El tamaño de la celda depende de la potencia del transmisor, banda de frecuencia utilizada, altura y posición de la torre de la antena, el tipo de antena, la topografía del área y la sensibilidad del radio receptor. Las celdas se clasifican de la siguiente manera:

- **Macroceldas**, con radios comprendidos entre 1.5 y 20 Km para cobertura rural, carreteras y poblaciones cercanas.
- **Microceldas**, con radios comprendidos entre 0.1 a 1 Km para cobertura de zonas de ciudades con elevada densidad de tráfico y penetración en edificios.
- **Picoceldas**, con radios comprendidos entre 30 a 100 metros para cobertura localizadas en interiores, como por ejemplo, aeropuertos, centros comerciales, túneles, bancos, etc.

- b) El centro de conmutación del servicio móvil (MSC):** Es el centro de control de los sistemas celulares; se encarga de conmutar las llamadas a las células, almacenar las bases de datos necesarias para los datos de usuarios y la gestión de la movilidad, redirigir las comunicaciones a otras partes de la red móvil o hacia otras redes (Red fija, Internet, redes privadas), monitorear el tráfico para fines de cobro, realizar pruebas y diagnósticos, y realizar labores de administración de la red en general.
- c) La estación de transmisión-recepción base (BTS):** Estaciones radioeléctricas fijas (Transmisor/receptor) que se despliegan en la zona de servicio de la red móvil. Un mayor número de estaciones base está ligado a una mayor capacidad de la red. Las estaciones base se encargan de monitorear la posición de cada terminal encendido, pasar el control de una llamada en curso a otra estación y enviar una llamada a un terminal suyo.
- d) La estación móvil (MS):** Es el transmisor/receptor móvil “teléfono celular”. Dispositivo usado para comunicarse en una red celular.

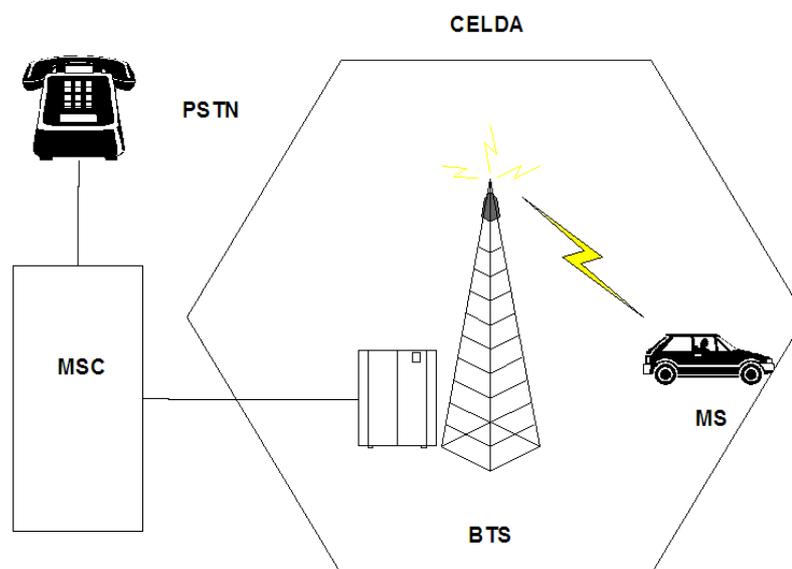


Figura 1.1 Elementos de la red celular

### 1.3.2 Reutilización de frecuencias y división en celdas

Como se mencionó anteriormente, en los sistemas celulares, el área de cobertura de un operador es dividida en celdas. El concepto de re-uso de frecuencias (Frequency reuse) se refiere al uso de las mismas frecuencias portadoras para cubrir distintas áreas separadas por una distancia suficientemente grande para evitar interferencia cocanal.

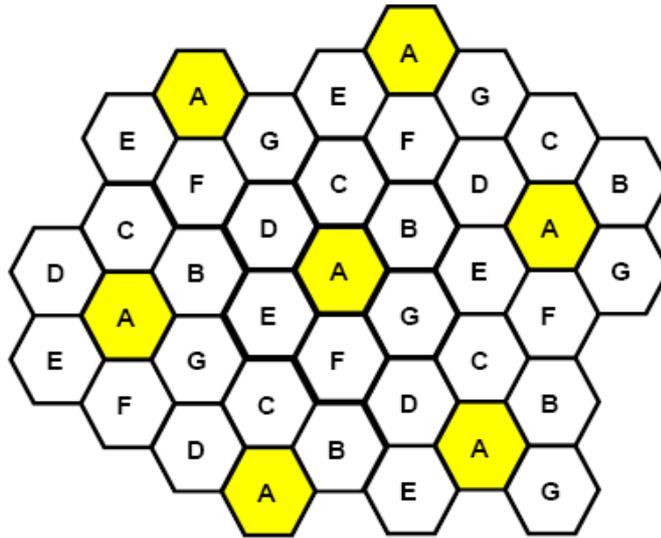
Las celdas utilizadas en los sistemas móviles celulares son del tipo hexagonal. Para un radio de cobertura  $R$  fijo, el hexágono es el polígono regular que presenta una mayor superficie de célula, más que los cuadrados

y los triángulos, por lo que utilizándolos, el número de células necesario para cubrir un territorio sería mínimo. Las celdas circulares no son válidas, ya que sus bordes no se solapan, quedando zonas sin cubrir (Zonas de silencio); y si se solapan, se producirían interferencias entre canales. Es importante aclarar lo siguiente:

- La celda hexagonal es solo una herramienta de diseño y planificación.
- La cobertura real de una estación base asociada a cada celda queda determinada por las condiciones reales de propagación (Relieve del terreno) y las características de potencia y sensibilidad de los extremos terminales del enlace entre la estación base y el móvil.

Un canal de radio consiste en un par de frecuencias, una en cada dirección de transmisión, que son usadas para una operación full-duplex. Un canal de radio en particular,  $F$ , es usado en una zona geográfica llamada celda,  $C$ , con un radio de cobertura  $R$ . Para que en celdas distintas puedan reutilizarse los mismos canales, es necesario que las celdas estén separadas a una distancia  $D$ , denominada distancia de reutilización o distancia cocanal, que garantice un valor mínimo en la razón portadora a interferencia ( $C/I$ ).





**Figura 1.3** División en celdas

Con el fin de trabajar apropiadamente un sistema celular debe seguir dos condiciones:

- 1) El nivel de potencia del transmisor dentro de una celda debe estar limitado con el fin de reducir la interferencia entre transmisores de celdas vecinas.
- 2) Celdas vecinas no pueden compartir los mismos canales. Con el fin de reducir la interferencia las frecuencias pueden ser re-usadas siguiendo ciertas reglas.

### 1.3.3 Seguimiento

El móvil debe estar permanentemente localizado. Deben utilizarse registros de localización que señalen en todo momento dónde se encuentra. De este modo cuando se reciba una llamada, para cierto terminal, la red sabrá cómo encaminarla.

### 1.3.4 Traspaso

Dentro de las redes móviles, el traspaso o *"handover"*, es el cambio o transferencia de un radiocanal a otro en una comunicación ya establecida, con el fin de que dicha comunicación no se pierda al cambiar de celda. El cambio debe hacerse de forma totalmente transparente al usuario.

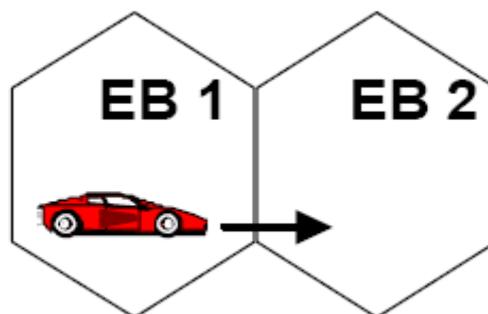


Figura 1.4 Traspaso (Handover)

Cada sistema tiene una solución para llevar a cabo este proceso, generalmente mediante mensajes de control (Señalización) que se intercambian entre los terminales móviles y la estación de control. Mediante algoritmos de decisión se determina cuando los handovers deben ocurrir, basados en factores tales como, el nivel de potencia recibido y la calidad de la señal.

### **1.3.5 Itinerancia**

La itinerancia o “*roaming*”, es la capacidad de hacer y recibir llamadas en redes móviles fuera del área de servicio local del operador; es decir, dentro de la zona de servicio de otro operador del mismo país, o bien a través de distintos países. Esto implica un esfuerzo de coordinación entre los operadores, sobre todo en cuanto a la tarificación de las llamadas [10] y [11].

### **1.3.6 Técnicas de acceso**

El sistema de múltiple acceso es usado para describir un concepto en el cual un sistema esté disponible para el uso de muchos usuarios. Se tienen tres tipos de técnicas de acceso, las cuales se mencionan a continuación.

### 1.3.6.1 FDMA

Múltiple acceso por división de frecuencia, es una técnica en la que el espectro es dividido en frecuencias y asignado a cada usuario. Los usuarios están separados por frecuencia. Con FDMA se le asigna un canal a un único suscriptor, el canal es utilizado hasta que la llamada inicial termine o hasta que la llamada sea traspasada a otro canal diferente. Una transmisión FDMA “full-duplex” requiere de dos canales, uno para transmitir y otro para recibir. FDMA ha sido usado para los sistemas analógicos de primera generación.

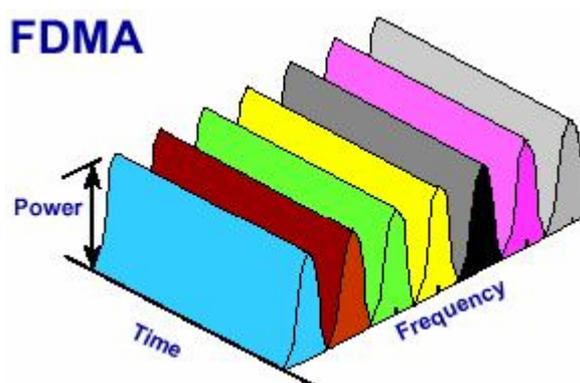


Figura 1.5 Técnica de acceso múltiple por división de frecuencia

### 1.3.6.2 TDMA

Múltiple acceso por división de tiempo, esta técnica utiliza las ventajas del procesamiento digital para hacer que un canal sea más eficiente. Mejora la

capacidad del espectro dividiendo cada frecuencia en time slots (Ranuras de tiempo), permitiendo a algunos usuarios compartir una misma frecuencia mediante la asignación de estas ranuras de tiempo, alternando su uso en períodos básicos. TDMA es la tecnología dominante en la segunda generación celular.

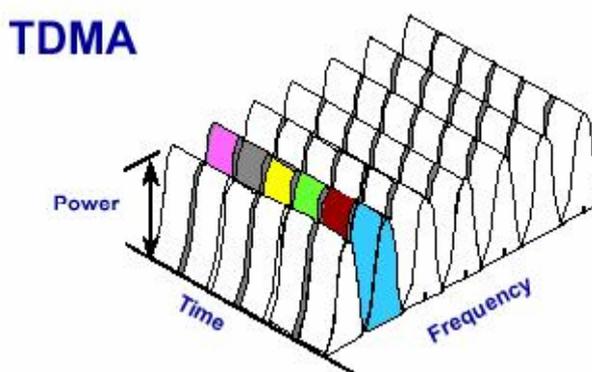


Figura 1.6 Técnica de acceso múltiple por división de tiempo

### 1.3.6.3 CDMA

Múltiple acceso por división de código, se basa en la tecnología de espectro ensanchado (Spread spectrum), permitiendo a todos los usuarios acceder al mismo canal de frecuencia al mismo tiempo. Un usuario es distinguido de los otros gracias a la codificación sofisticada de sus señales. Los usuarios son separados por códigos.

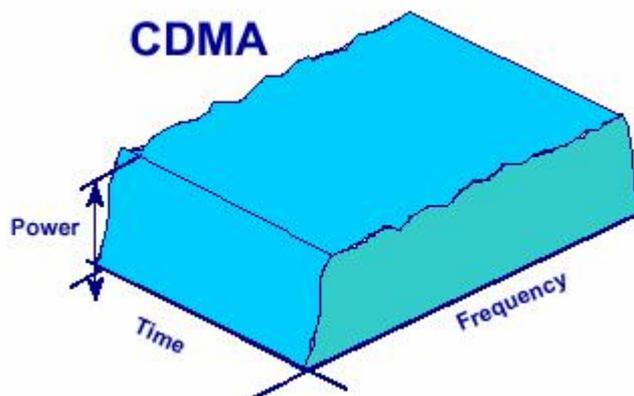


Figura 1.7 Técnica de acceso múltiple por división de código

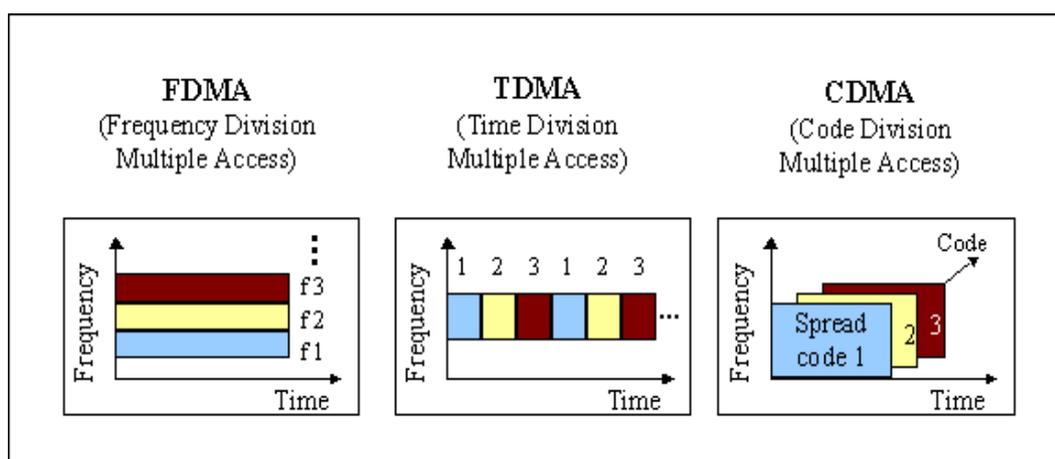


Figura 1.8 Tecnologías de acceso

### 1.3.7 Operaciones dúplex

Exceptuando situaciones especiales, la información vía radio se mueve en modo dúplex, lo cual significa que para cada transmisión en una dirección, se

espera una respuesta, y entonces se responde en la otra dirección. Hay dos formas principales de establecer canales de comunicaciones dúplex.

#### **1.3.7.1 Dúplex por división en frecuencia (FDD)**

Debido a que es difícil y muy caro construir un sistema de radio que pueda transmitir y recibir señales al mismo tiempo y por la misma frecuencia, es común definir un canal de frecuencia con dos frecuencias de operación separadas, una para el transmisor y otra para el receptor. Todo lo que se necesita es añadir filtros en los caminos del transmisor y del receptor que mantengan la energía del transmisor fuera de la entrada del receptor. Se podría usar una antena común como un sistema de filtrado simple. Los sistemas de filtrado se llaman duplexores y nos permiten usar el canal (Par de frecuencias) en el modo full-duplex; es decir, el usuario puede hablar y escuchar al mismo tiempo.

#### **1.3.7.2 Dúplex por división en el tiempo (TDD)**

Muchos sistemas de radio móviles, como los sistemas de seguridad públicos, no requieren la operación full-dúplex. En estos sistemas se puede transmitir y recibir en la misma frecuencia pero no en el mismo tiempo. Esta clase de dúplex se llama half-dúplex, y es necesario que un usuario dé una indicación

de que ha terminado de hablar, y está preparado para recibir respuesta de otro usuario.

### **1.3.8 GSM (Global system for mobile communications)**

En los comienzos de los años ochenta, muchos países en Europa habían desarrollado su propio sistema de telefonía celular análoga que impedía la interoperabilidad más allá de las fronteras de cada país. En 1982, el CEPT estableció un grupo de trabajo para desarrollar un sistema paneuropeo al que se denominó GSM (Groupe Speciale Mobile). El grupo propuso desarrollar un nuevo sistema inalámbrico móvil con las siguientes premisas: Itinerancia internacional (Roaming), soporte para la introducción de nuevos servicios, eficiencia espectral y compatibilidad con las RDSI. En 1989, la responsabilidad para el desarrollo del estándar GSM fue transferida al ETSI, que denominó al proyecto como Global System for Mobile Communications.

El estándar GSM define una red de telefonía móvil terrestre (PLMN) completa, de naturaleza digital que persigue una calidad subjetiva de voz alta, un bajo coste de los terminales, posibilidad de terminales reducidos, una gama de nuevos servicios, y los servicios estándar (Voz, datos a 9600bps, fax, SMS). En cuanto a la técnica utilizada de múltiple acceso se recurre a TDMA acompañado de FDD con saltos en frecuencia. Como precio a estos

requerimientos surge la limitación del ancho de banda que restringe la velocidad de transmisión, una alta sensibilidad a la propagación multicamino y un retardo adicional de procesado [10].

La evolución de GSM ha estado marcada por tres fases de evolución, la fase 1 (1991-1994), en la que se produjeron sus especificaciones y se definieron los servicios básicos; la fase 2 (1994-1995), en la que se propuso la inclusión de servicios suplementarios y protocolos de más alto nivel; y finalmente, la fase 2+ (1996-1998), en la que se realizan mejoras sobre la codificación de voz y se implementan servicios de transmisión de datos avanzados, entre ellos GPRS y EDGE, manteniendo la compatibilidad con las fases anteriores.

#### **1.3.8.1 Arquitectura de la red GSM**

Puede definirse un subsistema como una entidad constituida por uno o más equipos físicos encargados de ejecutar una tarea específica. La unión de todas estas tareas asegura el funcionamiento de la red. En la PLMN-GSM se distinguen los siguientes subsistemas: Estación móvil, estación base, red y operación y mantenimiento.

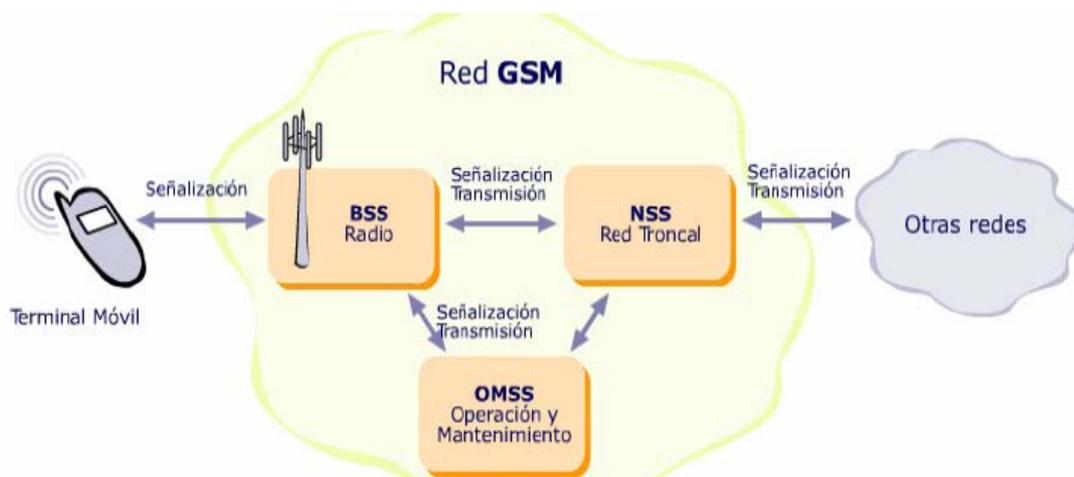


Figura 1.9 Red GSM

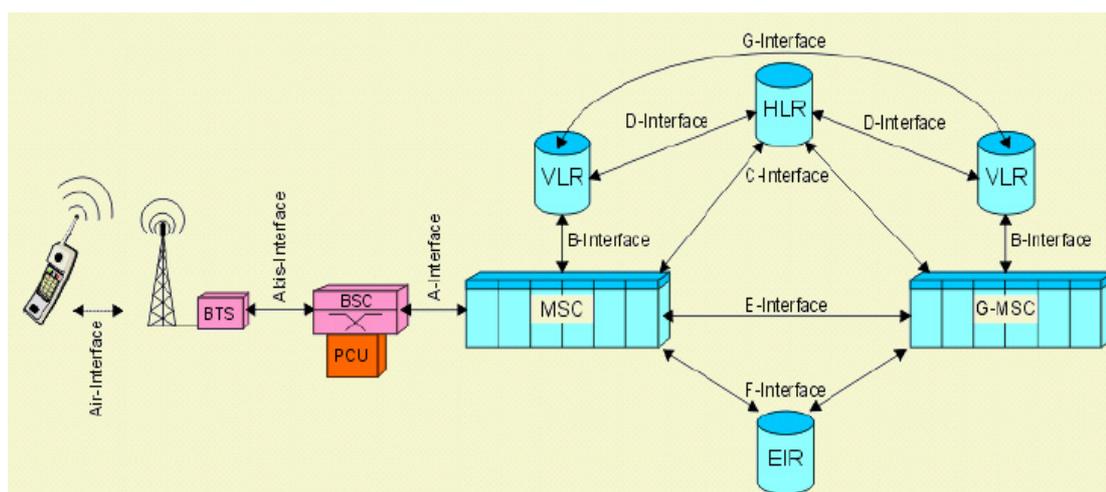


Figura 1.10 Arquitectura de la red GSM

### 1.3.8.1.1 La estación móvil

Es el punto de entrada a la red móvil inalámbrica. Es el equipo físico usado por el usuario GSM para acceder a los servicios proporcionados por la red.

La estación móvil está formada por el equipo móvil (ME) y por el módulo de identificación del suscriptor (SIM), un módulo insertable con memoria y microprocesador, que identifica al abonado en cualquier terminal que utilice.



**Figura 1.11** Teléfono GSM

Los ME pueden variar la potencia emitida, manteniendo la potencia óptima, a fin de limitar las interferencias cocanal y reduciendo también el consumo del terminal. También se utiliza el "Discontinuos Transmition" (DTX) que desconecta la transmisión cuando el usuario no habla, basado en la "Voice Activity Detection" (VAD) que detecta la presencia de actividad vocal. La BSS monitoriza permanentemente la calidad de comunicación. El equipo

móvil está identificado en la red GSM por el IMEI. El IMEI es un número de 15 cifras y tiene la siguiente estructura:

- TAC (Type Approval Code), determinado por el cuerpo central del GSM (6 cifras).
- FAC (Final Assembly Code), identifica al fabricante (2 cifras).
- SNR (Serial Number), número de serie.
- Sp, cifra suplementaria de reserva (1 cifra).

El SIM distingue entre la identidad del abonado y la del equipo móvil. Está asociado con el abonado, se trata de un chip que el usuario debe introducir en el terminal GSM. Contiene los siguientes datos:

- Número de serie.
- Estado del SIM (Bloqueado o desbloqueado).
- Clave del algoritmo de autenticación.

- Algoritmo de Autenticación (A3).
- Identificación internacional del usuario móvil (IMSI). Se compone del MMC (Mobile Country Code), MNC (Mobile Network Code) y del MSIN (Mobile Station Identification Number).



**Figura 1.12 SIM card GSM**

- Numero de secuencia de la clave del algoritmo de cifrado.
- Identificación temporal del usuario móvil (TMSI).
- Clase de control de acceso del usuario.
- Algoritmo de generación de claves de cifrado (A8).
- Clave del algoritmo de cifrado de señalización y datos (A5).

### 1.3.8.1.2 Subsistema estación base

El BSS está en contacto directo con las estaciones móviles a través de la interfaz de radio. Por lo tanto, incluye las máquinas encargadas de la transmisión y recepción de radio, y de su gestión. La misión del BSS se puede resumir en conectar la estación móvil y el NSS (Network and Switching Subsystem), y por lo tanto, conecta al usuario del móvil con otros usuarios. El BSS tiene que ser controlado, y por lo tanto debe estar en contacto con el OSS (Operation and Support Subsystem). Se compone de una o varias BTS's (Base Transceiver Station) y de un BSC (Base Station Controller). El BTS y el BSC se comunican entre sí mediante una interfaz estándar llamada 'A-bis'. El BSC se conecta a la MSC (Mobile Switching Center) mediante una interfaz tipo 'A', este concepto se introdujo al principio de la elaboración del estándar GSM [12].

**a) BTS:** El Base Transceiver Station, contiene los transmisores/receptores de la celda. Se encarga de proporcionar, vía radio (Interfaz Um), la conectividad entre la red y las estaciones móviles. Una parte importante del BTS es el TRAU (Transcoder/Rate Adapter Unit) que realiza la codificación y decodificación de la voz, y el control en las transmisiones de datos [13].



**Figura 1.13 Estación base GSM (ESPOL)**

- b) BSC:** El Base Station Controller, gobierna los recursos radio para las BTS's a él conectadas. Tiene las siguientes tareas de decisión: Gestión de radiocanales, controlar la conexión BTS-MSC, determinación de los

traspasos (Handover), control de potencia, elección de la celda y canal, salto en frecuencia (Frequency hopping), etc.

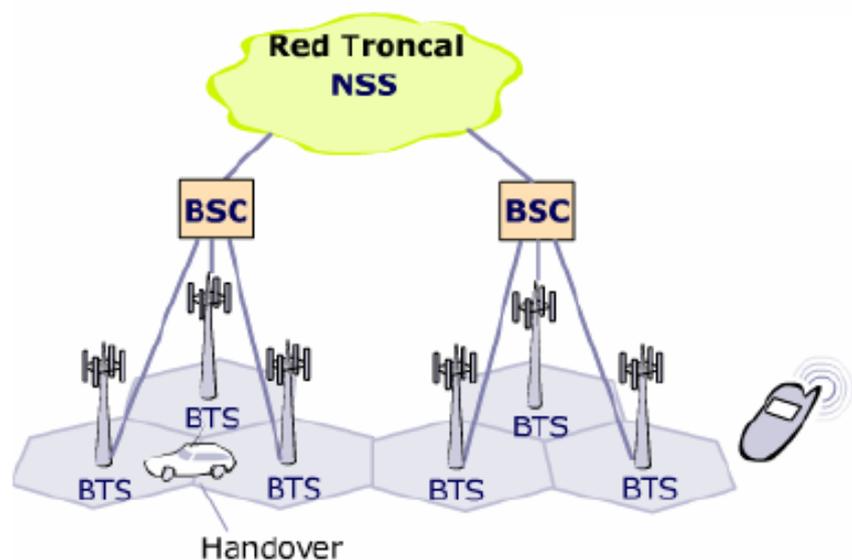


Figura 1.14 Subsistema estación base

### 1.3.8.1.3 Subsistema de red

El NSS incluye las principales funciones de conmutación en GSM, así como las bases de datos necesarias para los datos de los abonados y para la gestión de la movilidad. La función principal del NSS es gestionar las comunicaciones entre los usuarios GSM y los usuarios de otras redes de telecomunicaciones. Dentro del NSS, las funciones básicas de conmutación están realizadas por el MSC (Centro de Conmutación de Servicios Móviles). El NSS también necesita conectarse a las redes externas para hacer uso de

su capacidad de transportar datos o señalización entre entidades GSM. En particular el NSS hace uso de un tipo de señalización parcialmente externo a GSM, que sigue el sistema de señalización del CCITT nº 7 (Que usualmente se conoce como la red SS7); esta red de señalización habilita el trabajo interactivo entre máquinas del NSS dentro de una o varias redes GSM. Está formado por los siguientes elementos:

- **MSC:** La función principal es coordinar el establecimiento de llamadas hacia y desde los usuarios GSM. Funciona como una central de conmutación completa, se conecta con varios MSC dentro de la red, actualiza la posición de las MS y traspasa las llamadas entre BSC's. El MSC tiene interfaces con el BSS por un lado (A través del cual está en contacto con los usuarios GSM), y con redes externas por el otro. La interfaz con las redes externas requiere un "gateway" para la adaptación (Funciones de "Interworking"), cuya función es más o menos importante dependiendo del tipo de datos y de la red a la que se accede.
- **HLR:** El registro de posiciones base, que almacena la información del abonado (Identidad) relativa al suministro de los servicios de telecomunicación independientemente de la posición actual del abonado. Como una máquina física, un HLR es típicamente una

computadora independiente, sin capacidades de conmutación, y capaz de manejar a cientos o miles de abonados.

- **VLR:** El registro de posiciones de visita, va asociado a uno o más MSC's, y se encarga del almacenamiento temporal de los datos para aquellos abonados situados en el área de servicio del correspondiente MSC, así como de mantener los datos de su posición de una forma más precisa que el MSC.
- **AUC:** El centro de autenticación, proporciona al HLR parámetros para autenticar a un móvil y contiene los mismos algoritmos de autenticación que la tarjeta SIM. Se limita a la gestión de la seguridad de los datos de los abonados.
- **GMSC:** Para establecer una llamada hacia un usuario GSM, la llamada es primero encaminada a un conmutador-gateway llamado GMSC, sin ningún conocimiento de dónde está el abonado. Los GMSC's están encargados de buscar la información sobre la posición y encaminar la llamada hacia el MSC a través del cual el usuario obtiene servicio en ese instante.

- **EIR:** Registro de identidad del equipamiento, es la base de datos que almacena los IMEI's de los terminales móviles de un sistema GSM.

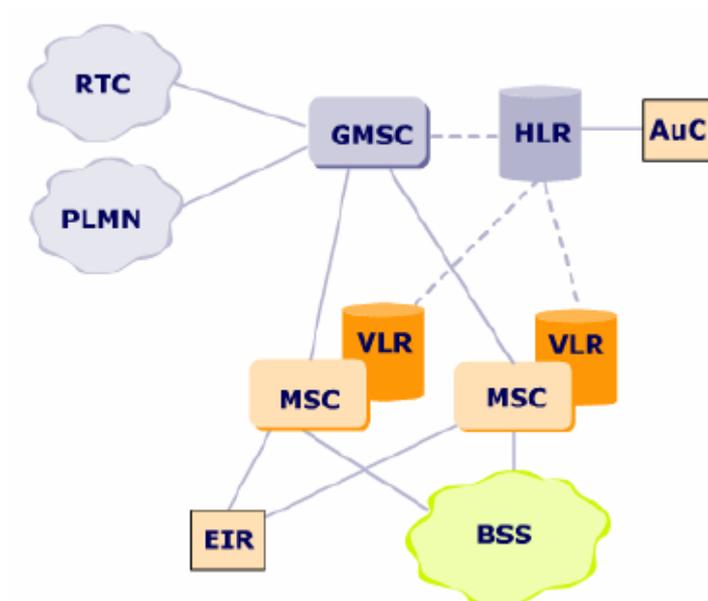


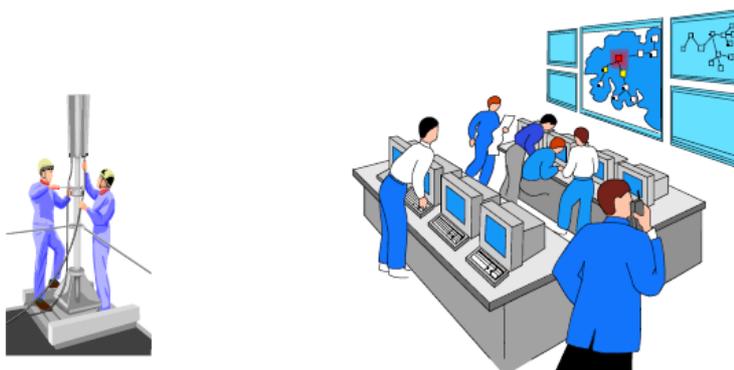
Figura 1.15 Subsistema de red y conmutación

#### 1.3.8.1.4 Subsistema de operación y mantenimiento

El OSS comprende la operación y mantenimiento. Permite monitorear, diagnosticar y resolver todos los aspectos de la red GSM. En el OSS se encuentran uno o varios OMC's utilizados para la monitorización y mantenimiento del desempeño de cada MS, BTS, BSC y MSC por parte del

operador. El centro de operación y mantenimiento tiene las siguientes funciones:

- Acceso remoto a todos los elementos que componen la red GSM.
- Gestión de alarmas y estado de la red.
- Supervisión y almacenamiento de datos de tráfico (Facturación).
- Configuración de la red e introducción de cambios.
- Administración de abonados y ubicación física en la zona de cobertura.



**Figura 1.16** Subsistema de operación y mantenimiento

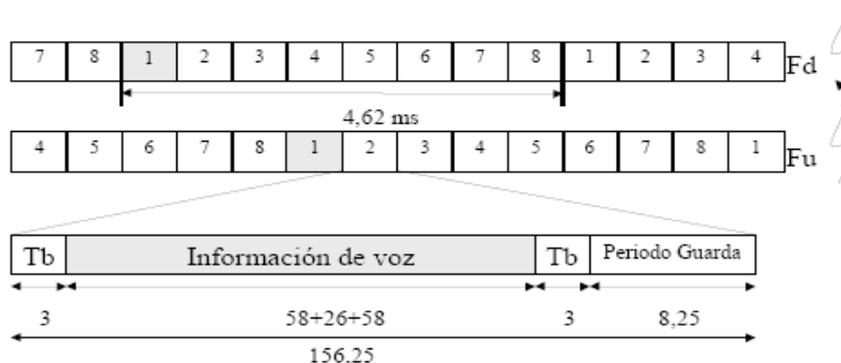
### 1.3.8.2 La interfaz de radio

Es la interfaz entre las estaciones móviles y las estaciones base, se la denomina como 'Um'. En la telefonía móvil los enlaces de radio son dúplex, GSM emplea dos frecuencias distintas, una para el enlace móvil-estación base (Enlace ascendente o uplink) y otra para el enlace estación base-móvil (Enlace descendente o downlink). Cada pareja de frecuencias es un radiocanal.

La señal empleada en GSM se modula digitalmente utilizando la modulación GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying). Se trata de una modulación de fase, en la que la señal moduladora es filtrada con un filtro gaussiano. De este modo se consigue que la mayor parte de la señal modulada quepa en menos de 200 KHz. Gracias a esto, la canalización en GSM se realiza en radiocanales de 200 KHz de ancho de banda llamados ARFCN (Absolute Radio Frequency Channel Number o Números de Canales de Radio Frecuencia Absolutos) y se pueden alcanzar tasas de bits de 270.83 Kbps. El ARFCN denota un par de canales "*uplink*" y "*downlink*" separados por 45 MHz y cada canal es compartido en el tiempo por hasta 8 usuarios usando TDMA. GSM utiliza una combinación de TDMA con FDMA y en las dos bandas de frecuencias (25 MHz) se utiliza el modo FDD.

Cada canal de 200 KHz es dividido en ocho ranuras (Slots) en cada una de las cuales se transmite una unidad de información. El número de total de canales disponibles dentro de los 25 MHz de banda es de 125 (Asumiendo que no hay ninguna banda de guarda). Dado que cada canal de radio está formado por 8 slots de tiempo, hacen un total de 1000 canales de tráfico en GSM. En implementaciones prácticas, se proporciona una banda de guarda de la parte más alta y más baja de espectro de GSM, y disponemos tan solo de 124 canales. La combinación de un número de TS (Slot de tiempo) y un ARFCN constituyen un canal físico tanto para el "uplink" como para el "downlink". Cada canal físico en un sistema GSM se puede proyectar en diferentes canales lógicos en diferentes tiempos. Es decir, cada slot de tiempo específico o trama debe estar dedicado a manipular el tráfico de datos (Voz, fax o sms), o a señalar datos (Desde el MSC, BTS o MS).

Las especificaciones GSM definen una gran variedad de canales lógicos que pueden ser usados para enlazar la capa física con la capa de datos dentro de las capas de la red GSM. Estos canales lógicos transmiten eficientemente los datos de usuario, a parte de proporcionar el control de la red en cada ARFCN. GSM proporciona asignaciones explícitas de los slots de tiempo de las tramas para los diferentes canales lógicos.



**Figura 1.17 Tramas en el enlace de radio**

### 1.3.8.3 Canales lógicos

GSM distingue entre canales físicos (Las ranuras de tiempo) y canales lógicos (La información portada por los canales físicos). Algunas ranuras de tiempo en una portadora constituyen un canal físico el cual es usado por diferentes canales lógicos para transferir información, tanto de señalización como del usuario. Los canales lógicos en GSM se clasifican en dos grandes grupos: Canales comunes y canales dedicados.

Los canales de tráfico (TCH-Traffic Channels), que transportan información (Voz o datos) del usuario y los canales de control (CCH-Control Channels), que transportan señalización y sincronización entre la estación base y la estación móvil. Sus funciones y formas varían según el enlace [10].

### 1.3.8.3.1 Canales comunes

Los canales comunes son aquellos que transmiten información de señalización común a todos los móviles que se encuentran en una celda dada. Entre ellos se distinguen los canales de difusión (BCCH) y los canales de control común (CCCH).

**a) Canales de Difusión (Broadcast Channels):** Los canales de difusión son canales de control utilizados para permitir el enganche de los móviles y el monitoreo de las potencias de los móviles.

- **FCCH (Frequency Correction Channel):** Canal descendente. Por él se envía una frecuencia piloto para sincronización de la frecuencia de recepción (En consecuencia de transmisión) de las MS.
- **SCH (Synchronization Channel):** Canal descendente. Transmite información de sincronización (Número de trama, de time slot, etc.) y de identificación de la estación base (BSIC).
- **BCCH (Broadcast Control Channel):** Canal descendente. Proporciona información general sobre la estación base (Identificación de la celda, LAC, configuración de los canales

comunes, celdas con acceso prohibido, células vecinas o adyacentes, etc.).

**b) Canales de Control Común (Common Control Channels):** Estos canales permiten el establecimiento de las llamadas y la asignación de otros canales de control.

- ***PCH (Paging Channel):*** Canal descendente que es utilizado para avisar a las MS cuando tienen comunicaciones entrantes.
- ***RACH (Random Access Channel):*** Canal ascendente que es utilizado por los móviles cuando necesitan acceder a la red, por ejemplo para realizar una actualización de localización, un registro o para el establecimiento de una llamada.
- ***AGCH (Access Grant Channel):*** Canal descendente que se emplea para la asignación de un canal de señalización SDCCH a las MS que previamente solicitaron recursos para continuar con el establecimiento de una comunicación.
- ***CBCH (Cell Broadcast Channel):*** Canal descendente utilizado para transportar el servicio de difusión de mensajes cortos.

- **NCH (Notification Channel):** Canal descendente que se emplea para el servicio de difusión a grupos cerrados de usuarios de llamadas de voz.

#### 1.3.8.3.2 Canales dedicados

- **Canales de tráfico (Traffic Channels):** Son los canales lógicos de tráfico a través de los cuales se transmite la información generada por los usuarios. Los canales de tráfico en GSM son bidireccionales pueden ser de velocidad completa "*full-rate*" o de velocidad mitad "*half-rate*", y pueden llevar voz digitalizada o datos de usuario. Cuando transmitimos a velocidad completa, los datos están contenidos en un TS por trama. Cuando transmitimos a velocidad mitad, los datos de usuario se transportan en el mismo slot de tiempo, pero se envían en tramas alternativas (Figura 1.17). En GSM, los datos TCH no se pueden enviar en el TS 0 (Time slot 0) sobre ciertos ARFCN's, ya que este TS está reservado para los canales de control y de broadcast en la mayoría de las tramas. Además, cada trece tramas de TCH se envía un canal de control asociado lento (SACCH) o tramas "*idle*". A cada grupo de 26 tramas consecutivas se le llama multitrama. De cada 26 tramas, la decimotercera y la vigésimo sexta se corresponden con datos

SACCH, o tramas idle. La trama número 26 contiene bits idle para el caso cuando se usan TCH's a velocidad completa, y contiene datos SACCH cuando se usa TCH's a velocidad mitad. Existen 7 canales de tráfico soportados [14]:

- 1) *Canal de tráfico a velocidad completa para voz (TCH/FS)*: Lleva voz digitalizada a 13 kbps. Después de la codificación del canal la velocidad es de 22.8 kbps.
- 2) *Canal de tráfico a velocidad completa para datos a 9.6 kbps (TCH/F9.6)*: Lleva datos de usuario enviados a 9600 bps. Con la codificación de corrección de errores los datos se envían a 22.8 bps.
- 3) *Canal de tráfico a velocidad completa para datos a 4.8 kbps (TCH/F4.8)*: Lleva datos de usuario enviados a 4800 bps. Con la codificación de corrección de errores los datos se envían a 22.8 bps.
- 4) *Canal de tráfico a velocidad completa para datos a 2.4 kbps (TCH/F2.4)*: Lleva datos de usuario enviados a 2400 bps. Con

la codificación de corrección de errores los datos se envían a 22.8 bps.

- 5) *Canal de tráfico a velocidad mitad para voz (TCH/HS)*: Ha sido diseñado para llevar voz digitalizada que ha sido muestreada a la mitad que la de un canal a velocidad completa. Después de la codificación del canal, la velocidad es de 11.4 kbps.
  - 6) *Canal de tráfico a velocidad mitad para datos a 4.8 kbps (TCH/F4.8)*: Lleva datos de usuario enviados a 4800 bps. Con la codificación de corrección de errores los datos se envían a 11.4 bps.
  - 7) *Canal de tráfico a velocidad mitad para datos a 2.4 kbps (TCH/F2.4)*: Lleva datos de usuario enviados a 2400 bps. Con la codificación de corrección de errores los datos se envían a 11.4 bps.
- **SACCH (Slow Associated Control Channel)**: Bidireccional. Es el canal de señalización “lento” asociado al canal de tráfico. En él se transmite información asociada a la conexión necesaria para la gestión de la movilidad y de los recursos de radio (Medidas de nivel

y calidad del DL de la celda a la que está enganchada el móvil, medidas de nivel de las celdas vecinas, etc.).

- **FACCH (Fast Associated Control Channel):** Bidireccional. Es el canal de señalización rápido asociado al canal de tráfico. Se utiliza para transmitir señalización que no puede esperar a que llegue el SACCH correspondiente (Por ejemplo la gestión de trasposos), sustrayendo bits de las tramas de tráfico por información de señalización.
  
- **SDCCH (Stand Alone Dedicated Control Channel):** Bidireccional. El SDCCH lleva datos de señalización siguiendo la conexión del móvil con la estación base, y justo antes de la conexión lo crea la estación base. Se asegura que la MS y la estación base permanezcan conectados mientras que la estación base y el MSC verifica la unidad de abonado y localiza los recursos para el móvil. El SDCCH se puede pensar como un canal intermedio y temporal que acepta una nueva llamada procedente de un BCCH y mantiene el tráfico mientras que está esperando que la estación base asigne un TCH. También se usa para enviar mensajes de autenticación y de alerta (Pero no de voz). A los SDCCH se les puede asignar su propio canal físico o pueden ocupar el TS0 del BCCH si la demanda

de BCCH's o CCCH's es baja. En detalle, el SDCCH se utiliza para transmitir toda la información de señalización necesaria para [9]:

- Establecimiento de una llamada: La información incluye la comprobación de la identidad del cliente, la autenticación del móvil, el número al que se llama y el establecimiento de los parámetros necesarios para el cifrado de la conversación.
  
- Encendido/apagado del móvil: IMSI (International Mobile Subscriber Identity) Attach/IMSI Detach.
  
- Actualización de posición: La información incluye la comprobación de la identidad del cliente, autenticación del móvil, establecimiento del cifrado e indicación del valor del nuevo LAC en el que quiere registrarse el móvil.
  
- Envío/recepción de SMS (Mensajes cortos): La información transmitida es semejante a la que corresponde al establecimiento de una llamada, pero además se incluye el contenido del mensaje.

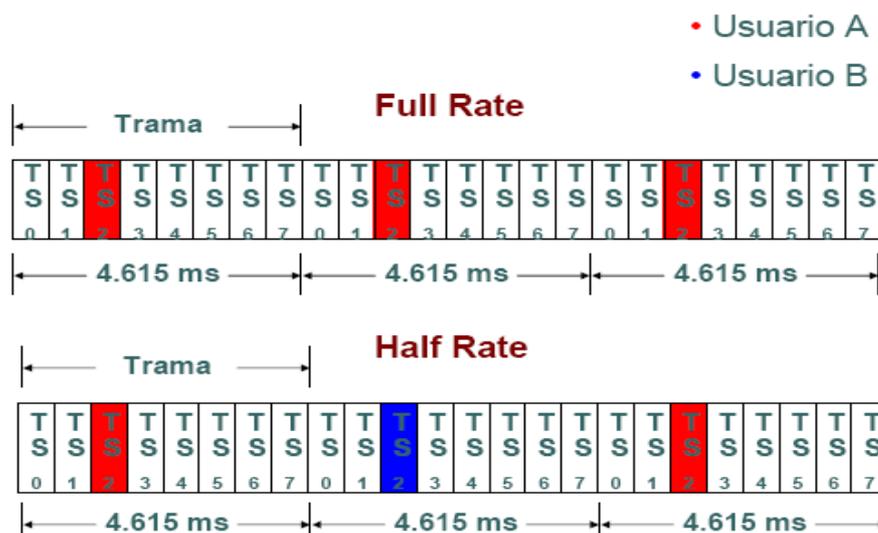


Figura 1.18 Canales de tráfico

#### 1.3.8.4 Servicios básicos

Existen tres categorías de servicios sobre GSM [15]:

- **Teleservicios:** Se refiere a los servicios básicos de telefonía. Llamada de emergencia, fax y sms.
- **Servicios portadores (Bearer):** Usados para la transmisión y recepción de datos.
- **Servicios suplementarios:** Generalmente extensiones de los teleservicios y que proporcionan nuevas características a la red

GSM. Desvío de llamadas, bloqueo de llamadas, identificador de llamadas, llamada en espera, transferencia de llamadas, etc.

### **1.3.8.5 GPRS (General packet radio service)**

#### **1.3.8.5.1 Evolución de las tecnologías de datos en GSM**

En un principio los únicos servicios de datos sobre los teléfonos móviles celulares se limitaban a transmisiones realizadas sobre el canal de voz GSM y al envío de mensajes cortos (SMS). Estas aplicaciones presentan ancho de banda reducido (9600 bps para transmisión de datos sobre GSM y 160bps para SMS) y latencia excesiva. Desde el punto de vista técnico, la conmutación de circuitos utilizada en GSM para la transmisión de datos resulta bastante ineficiente ya que se mantienen las líneas ocupadas durante mucho tiempo, aun cuando no hay datos circulando por ellas. Esta característica también es inadecuada desde el punto de vista del usuario final, que está pagando por la duración de la conexión, existiendo periodos en los que no está ni transmitiendo ni recibiendo datos.

El conjunto de carencias e inconvenientes enumerados con anterioridad, llevaron al desarrollo de nuevas tecnologías de datos sobre redes GSM de

2G: Basadas en conmutación de circuitos (HSCSD) y basadas en conmutación de paquetes (GPRS).

HSCSD (High Speed Circuit Switched Data) proporciona mayor velocidad en la transmisión de datos desde el móvil y utiliza una nueva codificación del canal radio de tráfico con 14.4 kbps/canal (En GSM es de 9.6 kbps), pudiendo emplear hasta 4 canales (57.6 kbps), sin embargo, necesita establecimiento de la llamada y obliga a la red a mantener el circuito aunque no haya tráfico. No es, por lo tanto, muy eficiente y no ha tenido mucha difusión. Se ha considerado como un paso previo a GPRS.

#### **1.3.8.5.2 Arquitectura GPRS**

En el GPRS los paquetes de datos también son enviados a través de múltiples slots de tiempo. Los slots son ubicados conforme la demanda de los paquetes enviados o recibidos. Se consigue de esta forma un servicio de datos con conexión permanente (Always on) sin la necesidad de reservar slots de tiempo para el transporte de datos. Para ello utiliza los siguientes mecanismos [16]:

- Empleo de esquemas de codificación mejorados respecto a los del GSM y de naturaleza dinámica en función de las condiciones imperantes en el medio radio se utiliza un esquema u otro.
  
- Posibilidad de asignación de varios intervalos de tiempo a una comunicación de datos con reserva independiente de los intervalos para los enlaces ascendente y descendente. De este modo, usando los 8 TS puede alcanzarse una tasa de hasta 171,2 Kbps teóricos, y el sistema puede acomodarse al carácter asimétrico de muchas comunicaciones de datos.
  
- Posibilidad de asignación compartida de los recursos radio entre varios usuarios, mediante multiplexación dinámica.
  
- Utilización de la conmutación de paquetes, tanto en la red como en el acceso radio.

GPRS no utiliza las centrales de conmutación GSM, sino que las estaciones base de radio están directamente conectadas a la red IP a través de dos nuevos tipos de servidores: SGSN (Serving GPRS Support Node) y el GGSN (Gateway GPRS Support Node), también denominados nodos GSN. Los nodos GSN (GPRS Support Nodes) son los responsables de la conmutación

y el encaminamiento de los paquetes entre los terminales móviles (MS) y las redes de datos externas (PDN's). Estos nodos interoperan estrechamente con el HLR, VLR y BSS pertenecientes a la red GSM [1] y [16].

- **SGSN:** Es el nodo de conmutación de paquetes y se sitúa en el mismo nivel jerárquico que las MSC en GSM. Este nodo es el responsable de la gestión de la conexión del terminal móvil a la red GPRS (GPRS Attach).
  
- **GGSN:** Actúa como interfaz con la red externa de datos. En un sentido, convierte los paquetes GPRS provenientes del SGSN, en el formato correspondiente a la red de datos, efectuando después el envío de los mismos, y en el sentido contrario, redirecciona los paquetes que llegan de las redes externas y los envía al SGSN que corresponda. Todo esto implica funciones de direccionamiento y encaminamiento. Si el terminal móvil no tiene una dirección IP fija, el GGSN será el encargado de gestionar el proceso de asignación dinámica. El GGSN también se ocupa de tareas de autenticación para el acceso a las PDN's, realiza funciones de seguridad y se encarga de la generación de CDR's.

- **PCU:** El controlador de paquetes (Software) tiene a su cargo el tratamiento de los paquetes de datos y de señalización. En el BSS, además realiza la inserción/extracción de tramas entre los enlaces Abis asociados a los canales de datos (Distinción entre paquetes de datos y voz). Junto con la BSC maneja y administra los recursos radio.

Para ampliar el límite de caudal de transmisión se ha desarrollado otra variante del GSM que es la tecnología EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) en la que se utiliza una modulación capaz de aumentar la capacidad de transmisión hasta 8 veces, lo cual junto con el empleo de GPRS permite alcanzar la velocidad teórica de 384 Kbps.

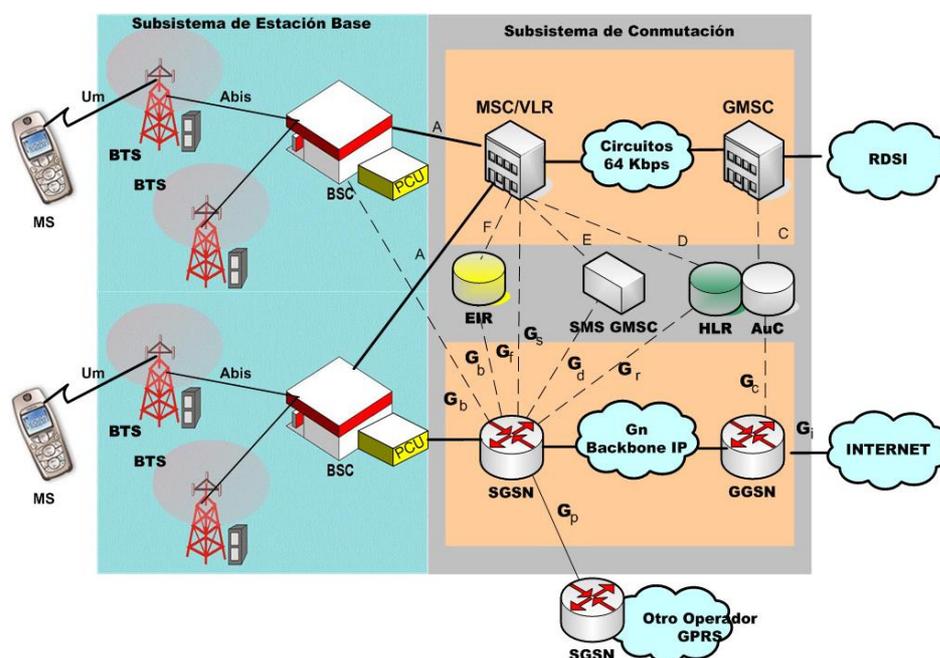


Figura 1.19 Red GSM/GPRS

### **1.3.8.5.3 Servicios GPRS**

El sistema GPRS está orientado a la prestación de servicios de datos:

- Conectividad desde el teléfono móvil con redes de paquetes, capaz de soportar aplicaciones basadas en X.25 y en IP. Ejemplos: Navegación WAP, Chat, e-mail, ftp.
  
- Mejora del servicio de mensajería, superando la limitación de 160 caracteres del SMS/GSM y permitiendo servicios de mensajería multimedia MMS (Audio, imagen y video).
  
- Consultas a bases de datos, intranet, telnet, etc.

# **CAPÍTULO 2**

## **GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DISTRIBUIDOS DE ANTENAS**

### **2.1 Introducción**

En general, las soluciones para ambientes interiores (Indoor), son soluciones que proporcionan cobertura de RF dentro de edificios, en donde se tienen necesidades específicas de capacidad, calidad o cobertura. Las soluciones para interiores comprenden estándares de telefonía celular tales como TDMA, GSM, WCDMA y los que no son estándares celulares como por ejemplo Wireless LAN y Bluetooth.

Las soluciones para ambientes interiores, en la actualidad, son grandemente desplegadas en las redes móviles, cubriendo las necesidades de cobertura de los usuarios, mejorando el servicio e incrementando el tráfico. Los operadores, hoy en día, desarrollan análisis de rentabilidad en las posibles locaciones en donde se quiere instalar cualquier tipo de solución para interiores basados en el tráfico generado estimado. Si el tráfico estimado excede los parámetros establecidos por el operador, se puede justificar la inversión de la solución propuesta. Las estadísticas nos muestran que el 80% del tráfico generado en interiores es tráfico nuevo, ya que son áreas en donde anteriormente existían nulos de cobertura, liberando de esta manera la carga de los usuarios en las macroceldas de la zona, y como consecuencia de esto se aumenta la cobertura y capacidad.

El incremento del uso de servicios de datos de alta velocidad, requerirá que los operadores móviles desplieguen una gran cantidad de soluciones para interiores. Esto se observa principalmente en áreas urbanas en donde actualmente existen redes 2G/3G en desarrollo. Las soluciones para interiores, en combinación con el estándar y con aplicaciones wireless personalizadas, ofrecen un valor agregado a las edificaciones. Visitantes, empleados y transeúntes en general usan sus teléfonos celulares y laptops para acceder a datos que anteriormente no eran accesibles vía dispositivos inalámbricos. La gente hoy en día espera que sus teléfonos móviles

funcionen dentro de cualquier lugar como por ejemplo centros comerciales, aeropuertos, metros, oficinas, hoteles, garajes subterráneos, túneles, etc. [17] y [18].

## **2.2 Soluciones para interiores**

Es importante tener presente que independientemente de la solución que se vaya a implementar, algunos parámetros y requerimientos, tales como, el tamaño de la edificación, el diseño, número de usuarios esperados, tipo de arquitectura, etc., necesitan ser considerados cuando se utilizan soluciones para interiores.

Los ingenieros de RF usualmente utilizan planos de las edificaciones para basar su diseño, así como también realizan un levantamiento de la información en el sitio (Estudio del sitio) y se pueden incluir cualquier tipo de mediciones de RF en caso de ser requeridas. Existen varias soluciones para interiores y diferentes diseños en las que son empleadas, algunas de las soluciones más utilizadas para proveer cobertura en interiores son descritas a continuación [18].

### 2.2.1 Cobertura con macroceldas

La manera más común de ofrecer cobertura en edificios es con la señal que penetra proveniente de las macroceldas<sup>2</sup>, por ejemplo, de estaciones base con antenas montadas en torres. En muchos casos esto provee una cobertura satisfactoria para los usuarios, pero en otros casos no es aceptable. Paredes gruesas, estructuras metálicas y demás obstáculos atenúan las ondas de radios en los interiores de edificios. Túneles, metros y subterráneos son claros ejemplos en donde la cobertura generalmente tiende a ser pobre, al menos que soluciones para interiores sean implementadas.

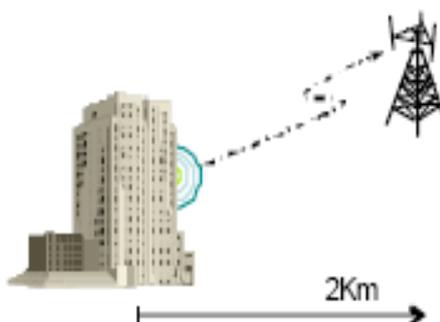


Figura 2.1 Cobertura desde una macrocelda

La principal ventaja de este tipo de soluciones es que no hay un costo adicional o inversión de recursos como en una solución para interiores. Algunas de las desventajas son, baja cobertura, bajas tasas de transmisión de servicios de datos y en algunas partes mala calidad.

<sup>2</sup> **Macrocelas:** Apartado 1.3.1. Celdas que cubren distancias mayores a 1 Km.

Una macrocelda también puede estar montada sobre una estructura rodante o vehículo llamado COW (Cell on wheels), y sirve para soluciones temporales de cobertura y capacidad, por ejemplo eventos deportivos, conciertos, convenciones, etc.

### **2.2.2 Microceldas**

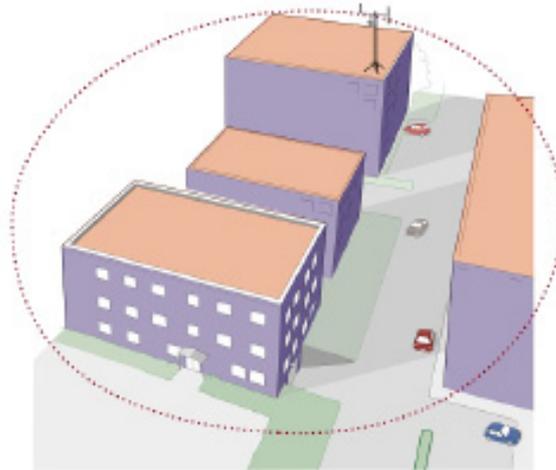
Corresponde al diseño de las radiobases tipo microceldas para atender zonas especiales con alta demanda de tráfico o de alta concurrencia como ocurre normalmente en los centros urbanos. Una microcelda<sup>3</sup> posee una cobertura pequeña, en la mayoría de los casos una cuarta parte de la cobertura de las macroceldas. Las micro BTS's, en GSM, poseen igual potencia que una macro BTS, pero se diferencia porque son de menor capacidad y tamaño. Las microceldas pueden ser instaladas tanto en ambientes interiores (Centros comerciales, aeropuertos, etc.), como en ambientes exteriores, por ejemplo, para cubrir una sección de una carretera, una calle, un callejón, esquina de cuadras, etc.

El uso de microceldas incrementa la capacidad de la red, ya que permiten un mayor manejo de tráfico. Desde el punto de vista del operador esto puede traducirse en ventajas adicionales, tales como, una mejor cobertura y mayor eficiencia en la operación del sistema. Los requerimientos claves del sistema

---

<sup>3</sup> **Microceldas:** Apartado 1.3.1. Celdas que cubren distancias menores a 500 m.

microcelular incluyen la coexistencia e interoperabilidad con los sistemas ya instalados, necesitándose un desarrollo mínimo de ingeniería para su diseño.



**Figura 2.2**      **Microcelda**

### **2.2.3 Cobertura con repetidores**

Los repetidores son sistemas de radiofrecuencia especializados que extienden la cobertura de radio hacia las áreas en donde se presenta un deterioro de la comunicación debido a la pérdida de propagación. El concreto, la roca, el suelo, las estructuras metálicas, obstáculos naturales y demás, bloquean notablemente las radiaciones electromagnéticas en los rangos de radiofrecuencia. Los repetidores, amplifican la señal de radio a niveles lo suficientemente aceptables para proveer una comunicación fiable en áreas cerradas.

El repetidor celular es un sistema cuya función principal es la de interponerse en el enlace entre la radiobase y los móviles, con el objetivo de mejorar los niveles de radiofrecuencia, degradado por diversos motivos. Las soluciones para interiores con repetidores son ampliamente usadas para cubrir carreteros, túneles, oficinas, etc.

Un sistema repetidor para interiores posee una antena donora (Donor) que es usada para la comunicación con la estación base. El repetidor amplifica la señal recibida desde la radiobase y la transmite por una antena de servicio (Service). La amplificación de la señal permite a los usuarios móviles recibir mejores niveles de señal y mejor calidad en sus equipos.

Los repetidores pueden estar conectados hacia antenas externas u otros repetidores si se requiere cubrir grandes áreas. Una de las ventajas de utilizar repetidores es la facilidad con la que pueden ser instalados (No se necesita de transmisión especial). La principal desventaja es que no proveen o está limitada la capacidad adicional. Los repetidores son usualmente provistos e instalados por la empresa de telefonía celular. Hay diferentes clases de repetidores tanto para ambientes interiores como exteriores, de baja y alta potencia, disponibles para la mayoría de sistemas y bandas de frecuencias [19].

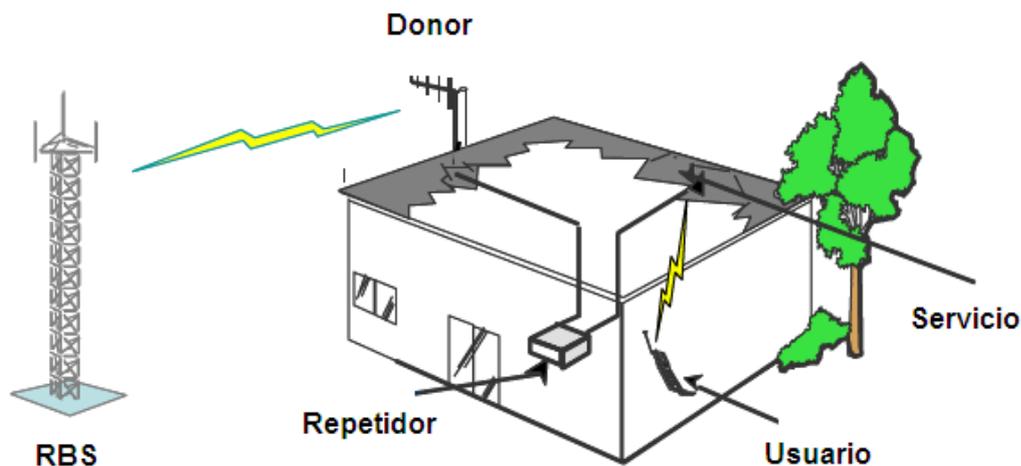


Figura 2.3 Cobertura en interiores con un repetidor

#### 2.2.4 Sistema distribuido de antenas

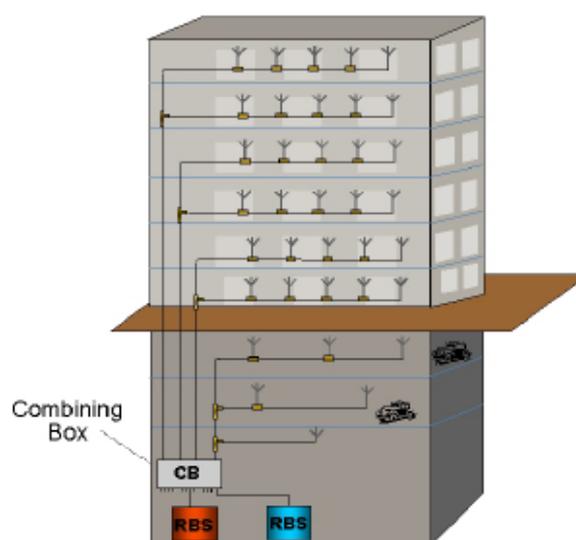
En las redes de comunicaciones móviles, las antenas se colocan normalmente en las terrazas de los edificios o en torres, dependiendo del entorno (Rural o urbano) y de las necesidades específicas de capacidad, cobertura y calidad del servicio. Aunque esta forma de colocar las antenas es la habitual, no es siempre la única. Hay ocasiones en que las antenas deben instalarse en el interior de edificios, túneles, o recintos tales como estadios, aeropuertos, etc., con el fin de proporcionar cobertura en zonas de acceso radioeléctrico difícil, y para ello se recurre a los sistemas distribuidos de antenas.

Un sistema distribuido de antenas (DAS), es una red de elementos que recibe una señal de frecuencia de radio (Inalámbrica), la convierte a un medio alámbrico, la transporta por una área, y la convierte de vuelta a una señal inalámbrica. Los DAS pueden ser clasificados en dos principales categorías, pasivos o activos. Los sistemas activos vuelven a repetir la señal de RF que es recibida antes de distribuirla al DAS; en cambio los sistemas pasivos no lo hacen y solo requieren de antenas, divisores de potencia, cables y conectores.

El DAS puede ser diseñado para manejar varias bandas, diferentes estándares y operadores. Compartir un DAS entre varios operadores permite ahorrar costos y espacio de arrendamiento. Conectar radiobases a sistemas distribuidos de antenas es una solución muy utilizada para grandes sistemas en edificios en donde se necesita gran capacidad, pero también hay la posibilidad de conectar repetidores a DAS que es una solución que en muchos casos satisface los requerimientos del diseño.

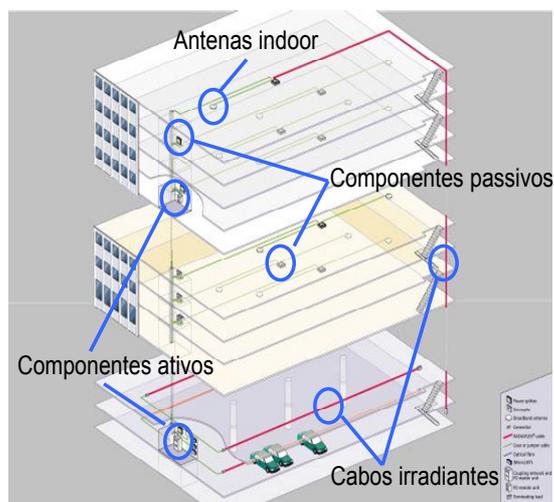
La figura 2.4 ilustra un ejemplo de un DAS pasivo. Un DAS pasivo se ajusta a muchos tipos de edificios y requiere de una mínima operación y mantenimiento después de ser desplegado. Sin embargo depende del tamaño y la cantidad de elementos y de la banda a ser distribuida. Por

ejemplo en túneles es posible instalar un DAS cuya longitud de cables (Coaxial) abarque solamente algunos cientos de metros.



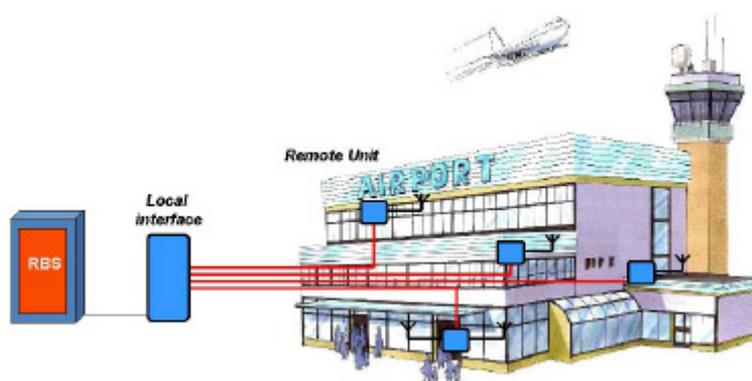
**Figura 2.4 Sistema distribuido de antenas**

Si se requiere cubrir grandes distancias, las soluciones de fibra óptica son preferidas. Este tipo de soluciones es algunas veces llamada “*Sistema de antenas activas*” o “*Sistema de repetidores de fibra óptica*”. Las soluciones con fibra óptica son casi siempre combinadas con DAS pasivos, en donde la parte pasiva distribuye la señal de RF en las áreas más cercanas a la radiobase, y el sistema de fibra cubre las distancias más largas. Este concepto es usualmente referido como una solución del tipo híbrida (Figura 2.5). Las soluciones de DAS activos permiten tener mejor control sobre la planificación de RF comparado con soluciones coaxiales pasivas.



**Figura 2.5 Solución híbrida**

Los sistemas repetidores de fibra óptica consisten de una unidad central que puede conectarse a varias unidades remotas a través del cable de fibra (Figura 2.6). De la potencia de salida de las unidades remotas, dependerá la cantidad de antenas que puedan ser conectadas a las mismas.



**Figura 2.6 DAS con fibra óptica**

## **2.3 Consideraciones iniciales de los sistemas distribuidos de antenas**

### **2.3.1 Tipos de sistemas distribuidos de antenas**

En el mercado actualmente se ofrecen varias soluciones de DAS, de entre los cuales tenemos:

#### **2.3.1.1 Sistemas distribuidos en base a cable coaxial**

Los primeros sistemas distribuidos de antenas se basaban únicamente en el cable coaxial como medio de conexión físico entre la fuente de RF y las antenas. En la actualidad sigue siendo de gran utilidad para dar solución a problemas puntuales de cobertura o de calidad no adecuada de señal, pese a las pérdidas muy elevadas que presenta en las bandas de comunicaciones móviles.

El cable coaxial consiste de un conductor de cobre rodeado de una capa de aislante flexible. Sobre este material aislante existe una malla de cobre tejida u hoja metálica que actúa como el segundo hilo del circuito y como un blindaje para el conductor interno. Esta segunda capa, o blindaje, también

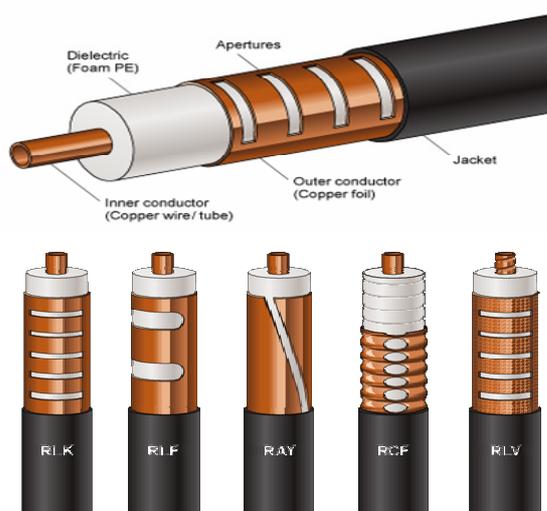
reduce la cantidad de interferencia electromagnética externa. Cubriendo la pantalla está la chaqueta del cable.



**Figura 2.7** Cable coaxial

### 2.3.1.2 Sistemas distribuidos en base a cable radiante

Igual a un cable coaxial, con pequeñas aberturas (Slots) en su conductor externo. Por estas ranuras la señal de RF es irradiada.



**Figura 2.8** Cables radiantes

### 2.3.1.3 Sistemas distribuidos en base a fibra óptica

El cable de fibra óptica permite transmitir información como pulsos luminosos a través de un conducto de fibra de vidrio. La fibra óptica transporta mucha más información que el cable de cobre convencional. La mayoría de las líneas de larga distancia de las compañías telefónicas utilizan fibra óptica.

En estos sistemas, el medio físico de conexión entre la BTS o equipo repetidor y las antenas es un cable de fibra óptica. Se pueden utilizar tanto en exteriores como en interiores, ya que el cable de fibra óptica se puede emplear en entornos agresivos. El uso de la fibra permite longitudes desde 5 hasta 20 kilómetros y, con un diseño adecuado se minimizan las pérdidas.

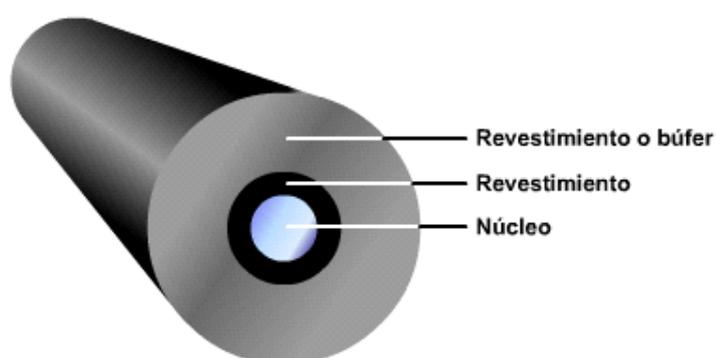
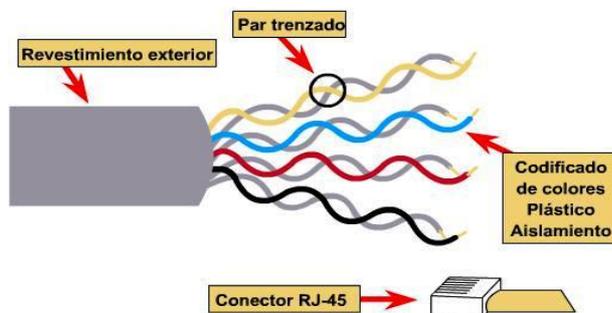


Figura 2.9 Fibra óptica

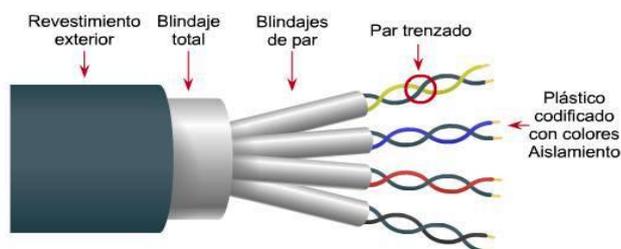
### 2.3.1.4 Sistemas distribuidos en base a pares trenzados (Cable UTP)

A esta solución se la puede considerar como un DAS activo, en donde el medio físico de conexión entre la fuente de RF y las antenas es el cable ScTP o UTP categoría 5/6.

#### Par trenzado sin blindaje (UTP)



#### STP (Par trenzado blindado)



#### ScTP (Par trenzado apantallado)

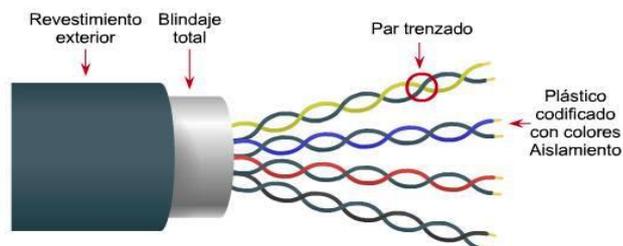


Figura 2.10 Cables de pares trenzados

El cable de pares trenzados, TP (Twisted pairs), está compuesto de varios pares de conductores enrollados entre sí. El trenzado ayuda a mitigar un efecto indeseable denominado *crosstalk*, que es el fenómeno por el que parte de la energía inyectada a un par, pasa a los adyacentes, originando pérdidas de señal en el cable y señales en los extremos de los otros pares. En la construcción de redes se utilizan varios tipos de cable TP, entre los más comúnmente utilizados tenemos el cable UTP, STP y el ScTP.

### **2.3.2 Características de propagación de RF**

Los aspectos relacionados con la propagación influyen, de distintas maneras, en los sistemas de comunicación inalámbrica. Primero, es obvio que la distribución de potencia sobre una cierta área o volumen es básica para los requerimientos de confiabilidad de la comunicación. La energía debe ser suficiente para el enlace en cuestión, pero no muy fuerte para evitar interferir sobre otros canales de celdas adyacentes. Por el hecho de que los enlaces de radio son muy variables sobre cortas distancias, no sólo importa la potencia, sino también interesa su distribución estadística. Como segundo punto, aunque exista suficiente potencia disponible, la calidad de la señal puede ser tal que muchos errores pueden ocurrir en cualquier momento. Los mecanismos de la propagación por radio son complejos y diversos, y

generalmente pueden atribuirse a los fenómenos de reflexión, difracción y dispersión.

La reflexión, ocurre cuando una onda electromagnética viaja y choca contra una obstrucción de dimensiones mucho mayor a su longitud de onda. Reflexiones desde la superficie de la tierra o desde edificios producen ondas reflejadas que pueden interferir constructiva o destructivamente al receptor.

Por otro lado, la difracción aparece cuando el camino entre el transmisor y el receptor es obstruido por un objeto impenetrable. Basado en el principio de Huygens<sup>4</sup>, ondas secundarias se forman detrás de la obstrucción incluso si no hay línea de vista entre el transmisor y el receptor. La difracción explica como la energía de RF puede viajar en ambientes urbanos y rurales sin línea de vista.

La dispersión, ocurre cuando la señal de radio se encuentra con objetos con dimensiones del orden o menores a la longitud de onda de la señal. La dispersión causa que la energía del transmisor sea re-irradiada en muchas direcciones. De los tres mecanismos, es el más difícil de predecir. Por ejemplo, en sistemas microcelulares urbanos, los postes de alumbrado y las señalizaciones de la vía dispersan la energía en varias direcciones,

---

<sup>4</sup> **Huygens:** Principio que establece que todo punto alcanzado por una onda se comporta como un emisor de ondas.

suministrando cobertura RF en lugares donde la energía no puede ser recibida mediante reflexión o difracción.

El ambiente de radio es muy importante en el diseño de cualquier solución, de ello dependerá el evitar interferencias con otras fuentes de RF, si se diera el caso; además de establecer los límites de cobertura que tendrá el sistema de acorde a los objetivos iniciales del diseño [20].

### **2.3.2.1 Propagación al aire libre**

Se emplea la técnica de reutilización de frecuencias, la cual se obtiene estableciendo una cobertura de estructura celular, desde las estaciones base. En general, las celdas son clasificadas en macroceldas o microceldas, de acuerdo a su tamaño.

Las macroceldas fueron la base de los primeros sistemas inalámbricos, con estaciones bases localizadas en sitios altos, para lograr una cobertura de varios kilómetros. Las microceldas, pueden acomodar a muchos suscriptores por unidad de área de servicio y poseen características de propagación más suaves que las macroceldas, por lo que son frecuentemente usadas en áreas urbanas donde existe un alto tráfico de abonados [20].

### **2.3.2.2 Propagación en lugares cerrados**

La comunicación en este tipo de ambientes se ha venido incrementando, sobre todo si trata de servicios de voz y datos. Los sistemas para lugares cerrados pueden dividirse en sistemas celulares y redes LAN. En los sistemas de comunicación para lugares cerrados, muchos aspectos del diseño están directamente ligados al ambiente de propagación.

Dentro de los edificios, la geometría de propagación se puede dividir en dos clases, cuando el receptor y el transmisor poseen línea de vista y, cuando no la tienen. Existe un número importante de eventos que deben ser considerados en el diseño tales como los desvanecimientos temporales producto de objetos o personas en movimiento, retardos multicaminos, y las pérdidas del trayecto [20].

### **2.3.2.3 Predicciones**

La ruta que sigue la señal desde el transmisor hacia el receptor puede ser desde una simple y sencilla línea de vista hasta un ambiente en el cual tengamos una gran cantidad de obstáculos como edificios, túneles, montañas, o árboles que la interfieran. La predicción es un conjunto de operaciones y procesos, usados para representar las características de radio

de un ambiente dado. Al realizar una predicción del comportamiento a nivel de RF, se puede estimar mejor la ubicación óptima de las antenas del sistema, así como también presupuestar las pérdidas de señal a través del camino hacia el móvil que se van a tener por la atenuación de los materiales de la edificación.

#### **2.3.2.4 Predicción de RF para exteriores**

Para los ambientes exteriores la predicción se obtiene combinando las diferentes coberturas de las celdas circundantes. Los modelos matemáticos de predicción de radiopropagación de telefonía celular consideran la multitrayectoria que esta basada en la reflexión y la difracción, por ejemplo, la energía que llega a la antena receptora es reflejada por los edificios, calles, lagos, etc. o llega difractada debido a los bordes, como las esquinas de los edificios o los obstáculos redondos, como tanques de agua o cumbres. Debido a que cada señal llega hacia la antena receptora por diferentes rutas y con diferentes fases, esta puede presentar un desvanecimiento de amplitud constructivo o destructivo.

Con este fin se puede utilizar un software de predicción de cobertura (Herramienta de predicción) que son ampliamente utilizados por las empresas encargadas de montar la red, y que entregan una buena

aproximación del nivel de señal real, empleando un modelo de propagación específico y tomando en cuenta numerosas variables como la topografía, perfil del terreno, la presencia de los distintos obstáculos, distancias, si el área es urbana, rural, etc., lo que dará como resultado un mapa de cobertura con la respectiva distribución de niveles de señal [21].

### **2.3.2.5 Predicción de RF para interiores**

Con el advenimiento de PCS surgió un gran interés en caracterizar la propagación dentro de las construcciones, para lo cual era necesario considerar muchos factores y fenómenos que la afectan. La señal transmitida alcanza al receptor por más de una trayectoria o ruta, a través de reflexión, refracción y difracción de las ondas de radio a causa de objetos como paredes, ventanas y puertas dentro de un edificio. La propagación en interiores considera estos fenómenos, pero bajo condiciones mucho más variables que las que se acostumbran considerar para exteriores.

La propagación en interiores no está influenciada por el perfil del terreno como la propagación en ambientes abiertos, pero puede ser afectada por la estructura del edificio, especialmente si hay varios tipos de materiales de construcción, por lo tanto es necesario que en el anteproyecto se realicen estudios de las pérdidas de RF que se tendrán por cada tipo de material o

estructura, esto ayudará en el criterio de selección de ubicación de los equipos, como de las antenas.

Según los estudios realizados, la potencia de la señal recibida al interior de edificios aumenta con la altura y disminuye con la frecuencia. El patrón de radiación de la antena tanto como la altura de esta y el ángulo de incidencia de la señal en las caras de un edificio, también juegan un papel muy importante en la penetración de RF. La presencia de ventanas en la zona de medición también afecta notoriamente en la potencia recibida. Además la potencia de la señal recibida incrementa a medida que se sube de piso, pero a partir de cierto piso, la atenuación comienza a aumentar muy levemente, esto debido al efecto de sombra producido por edificios adyacentes [22].

#### **2.3.2.6 Información de la edificación**

Entre los diferentes tipos de materiales comúnmente utilizados en la construcción de una edificación existe una gran variación de la atenuación de la señal de radio para el rango de las frecuencias de la banda de los 800 - 900 MHz. Es por eso que la información que se obtenga de la estructura de la edificación es de importancia para la implementación de un DAS. Esta información que debe ser recopilada, es de gran ayuda al realizar las predicciones de propagación de la señal en los interiores de la edificación, ya

que cuando hay diferencias notables con los resultados de las mediciones sirve para explicarlas. Algunos de los requerimientos acerca de la edificación que se necesitan como paso previo para la predicción de RF y el diseño se presentan a continuación:

- Planos detallados de la edificación y su escala.
  
- Materiales utilizados en la edificación, tanto de interiores como de exteriores.
  
- Objetos, mobiliario y densidad de personas que transitan en la edificación.
  
- Análisis del ambiente externo y edificaciones circundantes (Tamaño y distancia).

#### **2.3.2.7 Atenuación en las edificaciones**

El material usado para la construcción de una estructura influye de manera significativa en la atenuación de las ondas de radio. Construcciones de concreto y metal representa menor atenuación que edificaciones hechas con acero sólido. Edificios que poseen una vista de planta cuadrada tienen

mayor grado de atenuación que construcciones con vista de planta rectangular. Ventanas con pinturas metálicas dificultan la transmisión de RF, causando mayores atenuaciones entre los pisos del edificio. En las edificaciones encontramos algunos factores que contribuyen a la pérdida de la señal de radio.

#### **a) Atenuación debida al cuerpo humano**

Con el aumento de la presencia de los teléfonos móviles los efectos de la atenuación debida al cuerpo humano y a la densidad de personas deben ser considerados, porque afectan a la pérdida de propagación como al desvanecimiento.

Estudios técnicos indican que la pérdida de propagación causada por el cuerpo humano es de 3 dB's en promedio. Además hay pérdidas adicionales cuando los teléfonos se encuentran guardados en estuches o bolsillos, que dependen del modelo del móvil utilizado. Por eso se deben considerar los peores escenarios de ubicación de las estaciones móviles para el diseño de un DAS. De ser posible, las mediciones de propagación se recomiendan realizar cuando el tráfico de público es normal.



**Figura 2.11 Estación de tren con alta densidad de personas**

## **b) Factores de atenuación en edificaciones típicas**

Las pérdidas debidas a la penetración en edificios se han definido como la diferencia entre la señal medida en el exterior a nivel de la calle y la medida en el interior del edificio. Este punto se refiere únicamente a las pérdidas debidas a la estructura del edificio. Dentro del mismo pueden aparecer otras pérdidas a causa de los materiales de construcción empleados y del contenido interior.

Las pérdidas de propagación que se producen en un edificio pueden variar considerablemente según el tipo de edificación y los materiales de construcción. La frecuencia de la señal y su ángulo de incidencia también son parámetros muy significativos. En consecuencia, los valores de

dichas pérdidas pueden variar entre unos pocos y varias decenas de decibelios.

En la tabla I se muestran valores promedio de atenuación de la señal de radio. Estos valores están basados en resultados de pruebas de campo [23] y [24].

<b>Tipo de Obstáculo</b>	<b>Pérdida (dB's)</b>
Área densa urbana	20
Área urbana	15
Área suburbana	8
Bosques, arbustos, vegetación natural	13 - 15
Espacio abierto	0
Atenuación por vehículos	6
Atenuación del cuerpo	3
Atenuación por edificios	12 - 18
Ventana (Pintura no metálica)	3
Ventana (Pintura metálica)	5 - 8
Paredes delgadas	5 - 8
Divisiones de madera	10
Paredes de bloques de concreto	15 - 20

Pérdidas entre pisos	20 - 30
Suelo / Techo grueso	15 - 20
Suelo / Techo muy grueso	20 - 25
Material Aislante (Aluminio)	4
Revestimiento de Aluminio	20
Escaleras metálicas	5
Ductos	1 - 8

**Tabla I. Valores promedio de atenuación**

### **2.3.2.8 Características de propagación en túneles**

Los túneles son largos, relativamente angostos, se encuentran debajo de la superficie o atravesando elevaciones geográficas y están rodeados de materiales tales como el concreto, suelo, rocas y otros. Los túneles se crean por diversos propósitos; minas, ductos, túneles vehiculares, vía férreas, subways, metros, etc.

Hoy en día en las ciudades se construyen túneles en carreteras y avenidas, se han desplegado modernas redes de ferrocarriles, y se han desarrollado otras estructuras subterráneas como por ejemplo las minas; todo esto lleva consigo asociada la necesidad de crear redes de comunicaciones que

permitan llevar a cabo tareas relacionadas con la radiodifusión, telefonía móvil y WLAN, explotación ferroviaria y minera, atención a los viajeros, seguridad, vigilancia, gestión y mantenimiento de las instalaciones, etc.

Una técnica que en los últimos tiempos ha sido muy utilizada para conseguir radiocobertura en túneles se basa en el empleo de cable radiante. Sin embargo, la aplicación de esta técnica en algunos casos resulta muy costosa y compleja (Atenuaciones elevadas y la necesidad de un elevado número de amplificadores). Por este motivo, y como una alternativa de menor costo y complejidad, existe un gran interés por parte de los operadores de telefonía celular en el empleo de antenas como sistema radiante.

Como en todo sistema distribuido de antenas, el empleo de antenas en túneles requiere de un diseño específico y de un estudio de propagación dentro del mismo, porque las características de un túnel difieren de otros túneles y de otros tipos de entornos. En los túneles, el mecanismo dominante de propagación es la reflexión múltiple, de manera que la onda radiada por una antena transmisora encuentra múltiples trayectos para llegar a la antena receptora. Debido a la amplia variedad de trayectos reflejados posibles, el resultado tiene características de multitrayecto con desvanecimiento de Rayleigh o de Rice. También aparecen pérdidas por difracción, inmediatamente después de una obstrucción debido al

apantallamiento. La atenuación a la propagación en túneles varía ampliamente y resulta particularmente afectada por las irregularidades, el cambio en la dirección del túnel y las obstrucciones, incluido el tráfico. Todo esto hace del túnel un medio sumamente complejo, más si tenemos en cuenta que suelen tener longitudes elevadas y secciones complejas.

Cuando se habla de propagación en túneles se puede considerar tres categorías de métodos de predicción: Los basados en guías de ondas, técnicas de trazado de rayos y análisis de pruebas de campo. El primero usa la teoría modal, debido a las fuertes características de guiado del túnel, dan aproximaciones analíticas para casos en que la sección del túnel tiene forma simple (Rectangular o circular). El trazado de rayos se basa en conceptos de la óptica geométrica, ya que las dimensiones del túnel son más grandes que la longitud de onda en espacio libre. Tiene la ventaja de que se puede aplicar a cualquier tipo de túnel sin importar la forma, como desventaja tiene el tiempo de cálculo que se requiere. Por último, está el análisis realizando pruebas de campo en túneles, que necesita de la recolección de medidas, en donde se pueden emplear diferentes tipos de antenas y frecuencias [24].

En este proyecto, se sustenta el diseño propuesto mediante pruebas de propagación, con recolección de medidas, en el túnel del Cerro del Carmen de Guayaquil. Para realizar dicha estimación se tiene en cuenta las

características del túnel (Dimensiones, trazado y longitud) y las características relacionadas con las antenas (Posición, ganancia, polarización y frecuencia) y del equipamiento en general.

### **2.3.3 Estudio del sitio (Site survey)**

El estudio del sitio, comúnmente conocido como “*Site survey*”, es la visita técnica que se realiza en el sitio mismo (Interior/Exterior - Público/Privado) en donde se implementará el sistema distribuido de antenas. En el estudio se realiza la evaluación del ambiente de radio (Análisis de cobertura) y se define la ubicación de los elementos del DAS, en especial, de las antenas a utilizarse y su mejor distribución, para cubrir las áreas de interés.

Generalmente, el análisis de cobertura se lo realiza mediante pruebas de “*drive test*”, que consisten en la medición del nivel de señal en calles y rutas del área de cobertura, y se efectúa utilizando vehículos equipados con instrumentos apropiados para este fin. Para estimar la cobertura en el interior se utiliza una magnitud de pérdida aproximada que generalmente se obtiene empíricamente, en algunos casos con un muestreo en edificios dentro del área de interés y otras veces con datos obtenidos en otros estudios. De aquí la importancia de contar con datos específicos del lugar preciso, ya que como se ha hecho notar anteriormente, las pérdidas por

penetración dependen fuertemente del tipo de construcción utilizado en cada lugar y de otros factores relativos a una red en particular.

En el site survey se revisa la infraestructura del sitio, de tal forma de garantizar la funcionalidad de la solución que se quiere implementar. Un factor muy importante que debe ser considerado es la cantidad de cable a utilizarse, ya que la factibilidad de la instalación dependerá de la distancia entre los equipos y las antenas, además de considerarlo para el cálculo de las pérdidas en la guía de onda (Cable) y el costo que implica. En la inspección del sitio, también se debe considerar las necesidades de estética para la instalación, los requerimientos del propietario de la edificación, en cuanto a seguridad, cobertura, y a la posición sugerida de antenas y equipos, y las expectativas de cobertura. Para el diseño, se divide en algunas áreas de cobertura a la edificación, con esto se obtendrá la cantidad necesaria de antenas para proveer el servicio.

El sistema distribuido de antenas trae como beneficio mayores áreas de cobertura, reducción de problemas de atenuación rápida de la señal y se pueden evitar de una manera más simple los problemas de saturación de RF, que en el caso de usar una sola antena para el área de servicio. Cuando se han definido las posibles opciones para la instalación de un DAS, el operador

de telefonía celular negociará el alquiler o compra de un espacio dentro o fuera de la edificación.

Es recomendable elaborar un informe técnico en donde conste un plano de la edificación y se detalle la solución a implementar, contemplando la cantidad de materiales y equipos a adquirir, la ubicación y selección óptima de antenas, y su posición durante la implementación, y en la medida de lo posible un diagrama de la cobertura esperada [25] y [26].

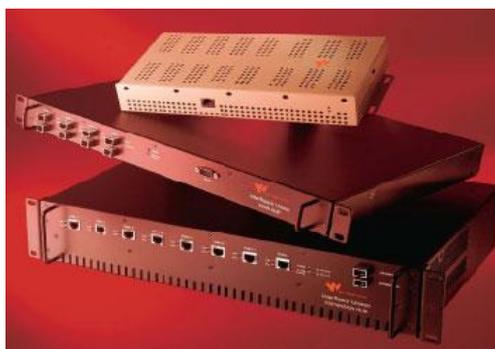
### **2.3.4 Equipamiento**

A continuación se describe el equipamiento que generalmente es utilizado en la implementación de los DAS. En el apartado 2.3.1 se encuentran algunas variantes de los DAS.

#### **2.3.4.1 Equipo DAS**

Es la solución activa o el equipo que permite implementar y desplegar el DAS en ambientes interiores. En términos generales y dependiendo del modelo y fabricante permite el paso de múltiples protocolos simultáneos (CDMA/GSM/TDMA/UMTS), y están disponibles en configuraciones single-band o dual-band. La distribución se la puede realizar por distintos medios

(Cable coaxial, UTP, fibra), acorde a los requerimientos de diseño e infraestructura [27].



**Figura 2.12** Equipo DAS

#### **2.3.4.2 Repetidor celular**

El repetidor celular va conectado al equipo DAS. Como se vio anteriormente (Apartado 2.2.3), es el equipo que amplifica la señal de radio para proveer una comunicación confiable. Básicamente, el repetidor no tiene ingerencia ni efectúa modificaciones a nivel de banda base, por lo tanto, es transparente a la información que transporta la portadora de radiofrecuencia, esto es importante al momento de efectuar un upgrade de tecnología celular.

A los repetidores celulares también se los conoce como BDA's (Bi-Directional Amplifiers), ya que la amplificación es en ambos sentidos (Downlink y Uplink)<sup>5</sup>. La utilización de repetidores es una alternativa técnico-económica

---

<sup>5</sup> **Downlink:** Camino descendente, desde la estación base hacia el móvil (Forward link).  
**Uplink:** Camino ascendente, desde el móvil hacia la estación base (Reverse link.)

viable para que la operadora celular despliegue la red en sitios donde la cobertura se encuentra disminuida por motivos de topología, infraestructura o bajo tráfico [25] y [28].



**Figura 2.13 Repetidor celular**

### **2.3.4.3 Antenas**

Una antena es un dispositivo que sirve para transmitir y recibir ondas de radio. Está formada por un conjunto de conductores que, unido a un generador, permite la emisión de ondas de radio frecuencia, o que, conectado a una impedancia, sirve para captar las ondas emitidas por una fuente lejana. En general, convierte la onda guiada por la línea de transmisión (El cable o guía de onda) en ondas electromagnéticas que se pueden transmitir por el espacio libre. Las antenas deben de dotar a la onda

radiada de dirección, es decir, deben acentuar un solo aspecto de dirección y anular o mermar las otras direcciones de radiación, esto es necesario ya que solo nos interesa radiar hacia una dirección determinada [29].

#### 2.3.4.4 Antena yagi

Antena constituida por varios elementos paralelos y coplanarios, directores, activos y reflectores, utilizada ampliamente en la recepción de señales televisivas. Los elementos directores dirigen el campo eléctrico, los activos radian el campo y los reflectores lo reflejan.

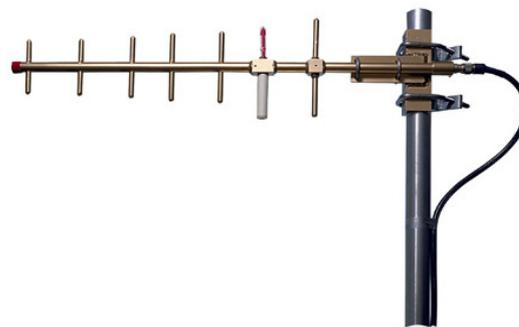


Figura 2.14 Antena yagi

#### 2.3.4.5 Antenas para interiores

Para ambientes interiores el tamaño y las formas de las antenas son sus limitantes, ya que deben ser lo más discretas posibles. Existen algunos

fabricantes que las han diseñado en una variedad de ganancias, patrones de radiación, modelos y tamaños, que van desde antenas omnidireccionales de ganancia unitaria, hasta antenas directivas de una alta ganancia y lóbulo estrecho.



**Figura 2.15 Antena omnidireccional y antena directiva**

En el anexo A se encuentran las especificaciones técnicas de diferentes tipos de antenas para interiores, que pueden ser utilizadas en la implementación de un DAS.

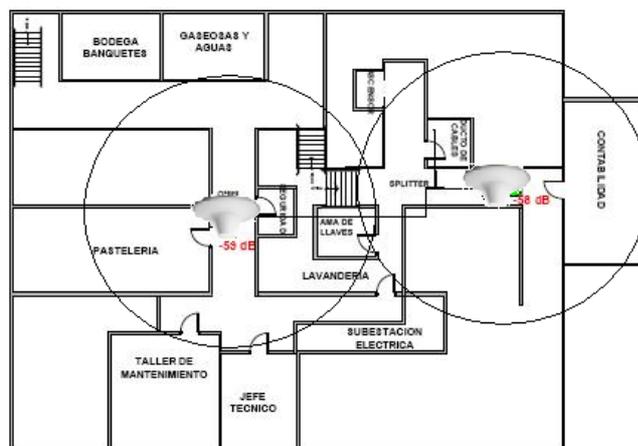
El sugerir una posición para la ubicación de las antenas dependerá de la aplicación que se realizará con el DAS, ya que existen varios criterios para la ubicación de las antenas tanto en interiores como en exteriores. Como

ejemplo, se puede citar que cuando se tiene una edificación de tamaño “normal” y de forma “regular”, una antena omnidireccional situada en el centro del sitio puede cubrir toda el área.



**Figura 2.16** Ubicación de antena omnidireccional en un área regular

Si el lugar no puede ser cubierto con una sola antena, debido a que el área a cubrir es grande, o por sus características arquitectónicas, el sitio se puede dividir en dos o más áreas con una antena ubicada en el centro de cada área (Figura 2.17). Se debe tener especial cuidado en la ubicación de tal manera que el tráfico se distribuya lo más equitativamente posible, o en el peor de los casos evitar que algunas de ellas no capte tráfico.



**Figura 2.17** Ubicación sugerida de más de una antena

### 2.3.4.6 Cable coaxial

Se define coaxial, al cable en el cual dos conductores tienen el mismo eje, siendo el conductor externo un cilindro separado del conductor interno por un material dieléctrico. El conductor externo, además de ser la línea de retorno, cumple con la función de blindaje. Cada cable coaxial debe cumplir con tres parámetros impuestos por el circuito al que se conectará: Impedancia característica, frecuencia de trabajo y atenuación máxima y/o potencia máxima.

La especificación más difundida que rige la fabricación de los cables coaxiales es la norma militar del gobierno de los Estados Unidos MIL-C-17 E que da las características dimensionales, eléctricas y una sigla que identifica

cada tipo de cable. Estos cables están definidos con las letras RG (Radiofrecuencia-gobierno) seguida de un número (Numeración progresiva del tipo) y de la letra U (Especificación universal) o A/U, B/U, etc., que indican sucesivas modificaciones y sustituciones al tipo original. Dentro de las variantes de cable coaxial se tienen los cables rígidos, semiflexibles, flexibles y superflexibles [30].

#### **2.3.4.7 Fibra óptica**

La fibra óptica es un conductor de ondas en forma de filamento, generalmente de vidrio, aunque también puede ser de materiales plásticos. La fibra óptica es capaz de dirigir la luz a lo largo de su longitud usando la reflexión total interna. Normalmente la luz es emitida por un láser o un LED [31].

Actualmente hay tres tipos de fibra óptica que se utilizan de acuerdo a la aplicación o implementación requerida, estos son: De núcleo y cubierta de plástico, que son empleadas para implementaciones de corta distancia, por ejemplo, dentro de un edificio; de núcleo de vidrio con cubierta de plástico; y de núcleo de vidrio con cubierta de vidrio, utilizadas para grandes distancias por su poca pérdida de propagación.

De acuerdo a la forma de propagación de la luz a través de la fibra óptica, esta se puede clasificar en dos tipos:

**a) Multimodo**

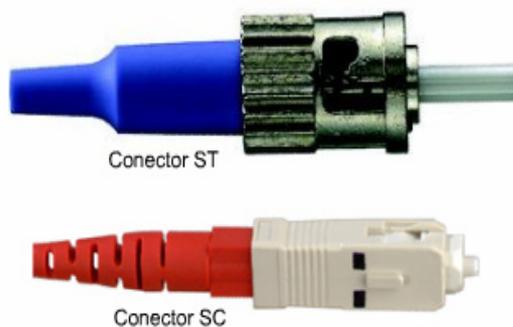
Se considera a una fibra óptica como multimodo si a través de su núcleo se puede propagar más de un modo de luz; este tipo de fibra se utiliza generalmente para aplicaciones de poca distancia. Su electrónica terminal es más barata y simple de diseñar. Como fuente de luz se usa normalmente un led.

**b) Monomodo**

Se la obtiene reduciendo el diámetro del núcleo (8 a 10 micrones de diámetro) hasta que solo permita que se propague un modo de luz. Sus equipos terminales son más caros, ya que deben ser más precisos para acoplar el haz de luz; cuya fuente es un láser de estado sólido, por el cual se consiguen alcanzar mayores distancias y velocidades.

Hay conectores unidos a los extremos de las fibras de modo que éstas puedan estar conectadas a los puertos del transmisor y del receptor. El tipo de conector que se usa con mayor frecuencia con la fibra multimodo es el

conector suscriptor (Conector SC). En una fibra monomodo, el conector de punta recta (Conector ST) es el más frecuentemente utilizado [32].



**Figura 2.18** Conectores para fibra óptica

#### **2.3.4.8 Par trenzado**

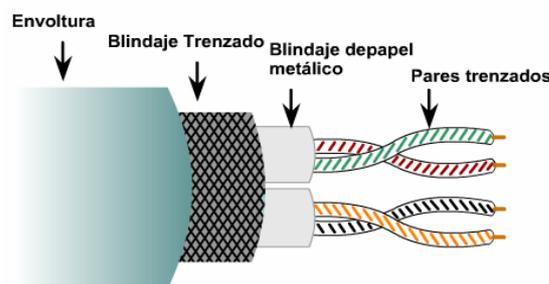
El cable de par trenzado es una forma de conexión en la que dos conductores son entrelazados para cancelar las interferencias electromagnéticas (IEM) de fuentes externas y la diafonía de los cables adyacentes. Este tipo de cable está formado por hilos, que son de cobre o de aluminio y estos hilos están trenzados entre sí para que las propiedades eléctricas estén estables y también, para evitar las interferencias que pueden provocar los hilos cercanos. El conductor interno del cable está aislado por una capa de polietileno coloreado. Debajo de este aislante existe otra capa de aislante de polietileno la cual evita la corrosión del cable debido a que tiene una sustancia antioxidante.

Normalmente este cable se utiliza por pares o grupos de pares, no por unidades, conocido como cable multipar. Para mejorar la resistencia del grupo se trenzan los cables del multipar. Los colores del aislante están estandarizados, y son los siguientes: Naranja/ Blanco-Naranja, Verde/Blanco-Verde, Azul/Blanco-Azul, Marrón/Blanco-Marrón.

Cuando el medio de transmisión es un cable TP, uno de los pares se utiliza para transmisión (TX), y otro para la recepción (RX). En la construcción de redes se utilizan varios tipos de cable TP y cada uno posee unas ventajas y unos inconvenientes, esto quiere decir que ninguno de estos tipos de cables es mejor que otro. Sobre todo se diferencian en su ancho de banda y en como les afectan las interferencias electromagnéticas.

#### **a) Apantallado (Shielded Twisted Pair - STP)**

El cable de par trenzado blindado combina las técnicas de blindaje, cancelación y trenzado de cables. Cada par de hilos está envuelto en un papel metálico, y los dos pares de hilos están envueltos juntos en una trenza o papel metálico. La protección de este cable ante perturbaciones es mucho mayor que la del cable UTP. Una de sus desventajas es ser un cable más costoso.



**Figura 2.19 Cable STP**

### **b) No apantallado (Unshielded Twisted Pair - UTP)**

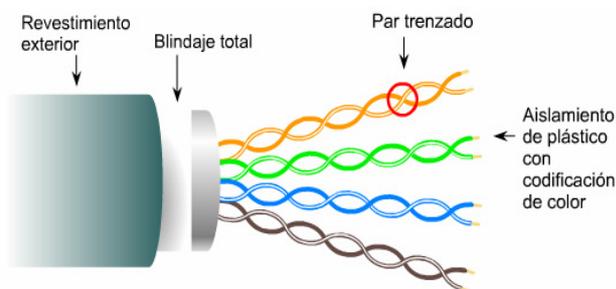
El cable de pares trenzados sin apantallar, es el clásico cable de red de 4 pares trenzados (8 hilos en total). Debido a que no dispone de protección contra las perturbaciones externas solo es adecuado para entornos relativamente libres de perturbaciones. Los pares están numerados (de 1 a 4), y tienen colores estándar, aunque los fabricantes pueden elegir entre dos opciones para la combinación utilizada. Algunos fabricantes exigen disposiciones particulares en la conexión, pero la norma TIA/EIA 568-A (EIA: Electronic Industries Alliance) especifica dos modalidades, denominadas T568A y T568B, que son las más utilizadas (La T568B es probablemente la más extendida).

En comparación con el apantallado es más barato, además de ser fácil de doblar y pesa poco. Las desventajas de este tipo de cable, es que

cuando se somete a altas temperaturas no es tan resistente a las interferencias del medio ambiente. Es comúnmente utilizado en redes de área local.

**c) Con pantalla global (Screened UTP-ScTP)**

El híbrido de UTP con STP tradicional se denomina UTP apantallado (ScTP), conocido también como par trenzado de papel metálico (FTP). El ScTP consiste, básicamente, en cable UTP envuelto en un blindaje de papel metálico. En este tipo de cable sus pares aunque no están apantallados, tienen una pantalla global (Formada por una cinta de aluminio) que provoca una mejora en la protección contra interferencias externas. Se suele utilizar para aplicaciones que se van a someter a una elevada interferencia electromagnética externa, ya que este cable tiene un gran aislamiento de la señal. Su precio es intermedio entre el del UTP y el del STP.



**Figura 2.20 Cable ScTP**

#### **2.3.4.8.1 Categorías de los cables de pares trenzados**

Hay varias categorías dentro de los cables de pares trenzados, las cuales se diferencian en su atenuación, impedancia y capacidad de línea. Las normas ISO/IEC (International Organization for Standardization - International Electrotechnical Commission) definen la calidad del cable en categorías según una escala de números empezando por el uno (Actualmente llega hasta el 7), por ejemplo, Cat-1, Cat-2, etc. Cada categoría debe garantizar determinados parámetros de transmisión, atenuación o pérdidas para un rango de frecuencias determinado.

En general, cuanta más alta es la categoría de un cable de par trenzado, mayor es el número de vueltas de sus conductores por unidad de longitud; además las frecuencias de prueba son más elevadas. A continuación una breve descripción de cada una de las categorías:

- a) **Categoría 1:** Alcanza como máximo una velocidad de 100 Kbps. Fue usado para comunicaciones telefónicas, ISDN y cableado de timbrado.
  
- b) **Categoría 2:** Fue frecuentemente usado para redes token ring (4 Mbps).

- c) **Categoría 3:** Usado en redes ethernet (10 Mbps). Diseñado para transmisión a frecuencias de hasta 16 MHz.
  
- d) **Categoría 4:** Frecuentemente usado en redes token ring (16 Mbps). Diseñado para transmisión a frecuencias de hasta 20 MHz.
  
- e) **Categoría 5:** Velocidad de hasta 100 Mbps, con un ancho de banda de 100 MHz. Se utiliza en las comunicaciones de tipo LAN. La atenuación de este cable depende de la velocidad.
  
- f) **Categoría 5e:** Igual que la anterior pero mejorada, ya que produce menos atenuación. Puede alcanzar velocidad de transmisión de 1 Gbps con electrónica especial.
  
- g) **Categoría 6:** Usado en redes gigabit ethernet (1000 Mbps). Diseñado para transmisión a frecuencias de hasta 250 MHz.
  
- h) **Categoría 6a:** Definido para ser usado en redes 10 gigabit ethernet (10000 Mbps). Diseñado para transmisión a frecuencias de hasta 500 MHz.

- i) **Categoría 7:** Usado en un futuro en redes 10 gigabit ethernet (10000 Mbps). Diseñado para transmisión a frecuencias de hasta 600 MHz [33] y [34].

#### 2.3.4.9 Divisores de potencia (Splitters y tappers)

Los splitters y tappers son elementos divisores de potencia utilizados en la combinación de antenas para obtener modelos de irradiación particulares o para la distribución de la señal en grandes edificios donde existen diversas antenas para interiores. El divisor o “*splitter*” divide la señal de entrada en dos o más partes iguales, mientras que los “*tappers*” dividen la señal según los requerimientos de diseño. Normalmente la pérdida es de 3 dB's por cada par de repartición [35].



Figura 2.21 Divisores de potencia

#### 2.3.4.10 Conectores

Los conectores de RF en teoría, son elementos lineales y pasivos en la cadena de transmisión. Su modelo está determinado en cada caso por la potencia de los equipos, y el medio en el que serán utilizados. En la práctica, todavía, poseen aspectos sujetos a interferencias, que a su vez pueden causar intermodulación. La presencia de material magnético en la composición del conector (Impurezas), la superficie de contacto de baja calidad, conductividad no lineal, dieléctricos no lineales, irregularidades en los contactos, imperfección en la protección contra humedad, son algunos ejemplos de causa de los problemas de intermodulación. Una correcta construcción y la selección de los materiales adecuados pueden minimizar significativamente estos efectos [35].



**Figura 2.22** Conector tipo N

# CAPÍTULO 3

## DISEÑO DEL SISTEMA

### 3.1 Objetivos

Lo que se pretende conseguir con el diseño de un sistema distribuido de antenas celulares para el túnel del cerro El Carmen se puede resumir en:

- a) Dar un tipo de solución efectiva y práctica al problema que representa el garantizar la cobertura celular en la totalidad de un túnel, que dependiendo de su longitud y trazado no puede ser cubierto con las radiobases más cercanas.
- b) Al ser implementado, mejorar la cobertura en áreas en donde las celdas existentes no poseen buenos niveles de señal, con esto se mejora el desempeño de la red celular y se optimiza su diseño.

- c) Establecer los lineamientos generales para la planificación y diseño de un sistema distribuido de antenas celulares para las diferentes estructuras tipo túnel a nivel nacional.
- d) Que el diseño propuesto pueda ser implementado por cualquiera de las tres empresas de telefonía celular que actualmente operan en el país, Porta, Movistar y Alegro.

## **3.2 Criterios de diseño**

### **3.2.1 Características del túnel del cerro El Carmen de Guayaquil**

Un túnel es una infraestructura subterránea artificial cuyo objeto es la comunicación de dos puntos. En general, se construyen a través de un monte, por debajo de un río u otro obstáculo similar. Pueden servir para el transporte de personas y materiales, tránsito de vehículos a motor, tráfico ferroviario, industria minera, etc. [36].

El túnel del cerro El Carmen de Guayaquil fue inaugurado el 5 de mayo del 2003, es un túnel para la comunicación vial que va en sentido norte-sur, empezando en las avenidas Pedro Menéndez Gilbert y Morán de Buitrón,

colindantes con el cementerio general, y termina al desembocar en la calle Boyacá, junto al hospital Luis Vernaza.

El viaducto es de hormigón armado con una longitud de 745,52 metros, el trazado consta de dos curvas y dos tramos en línea recta uno a la entrada y otro a la salida. Tiene tres carriles que se enlazan con los cinco carriles de la calle Boyacá, y aceras a los costados de la vía [37]. Posee estructuras que soportan los cables eléctricos, luminarias, ventiladores y las cámaras. Además, tiene conductos y cunetas para las aguas lluvias para evitar inundaciones y zonas verdes que equilibran el impacto ambiental, señalización horizontal y vertical y detectores de monóxido de carbono. El otro túnel de sentido complementario es el túnel del cerro Santa Ana [38].



**Figura 3.1** Ingreso al túnel del cerro El Carmen



### 3.2.2 Consideraciones en interiores

#### a) Tráfico vehicular

Se estima que actualmente por el túnel del cerro El Carmen circulan un promedio de 4000 vehículos en las horas pico y el trayecto desde la entrada a la salida en condiciones normales del tránsito vehicular no toma más de 2 minutos, considerando que la velocidad máxima permitida es de 50 Km/h en el interior del túnel (Ver anexo B) [38].

#### b) Medición de cobertura

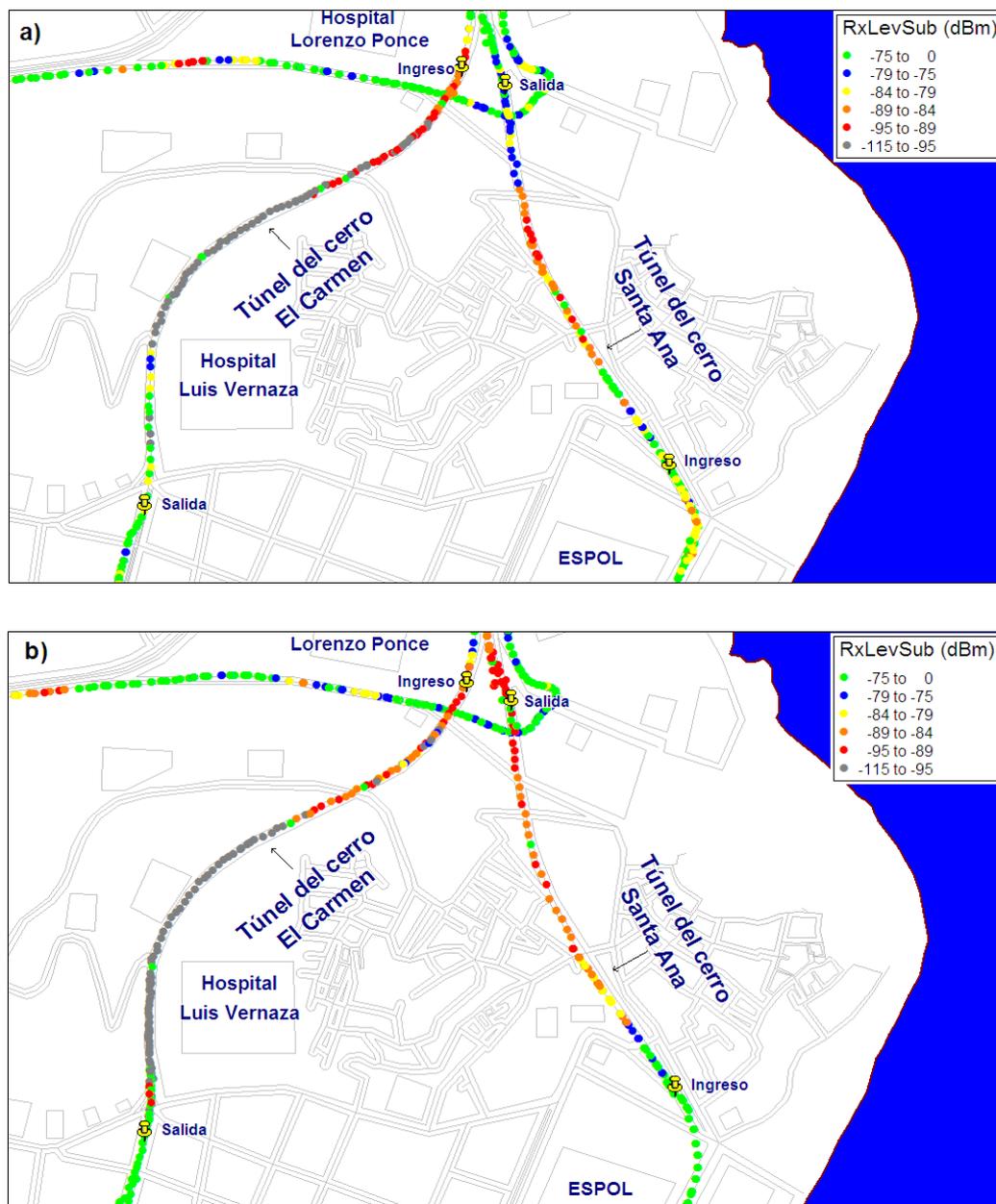
Antes de realizar el diseño de un DAS es importante evaluar la cobertura actual del lugar. Para el presente proyecto se realizaron mediciones de cobertura (Ambiente RF-Niveles de señal) en el interior del túnel del cerro El Carmen para los tres operadores de la tecnología GSM, bajo las modalidades de llamada continua y llamada corta.

La llamada continua o larga, es una llamada que se genera y se mantiene durante todo el recorrido de *drive test*, y permite determinar los tramos en los que los operadores garantizan la cobertura a nivel *incar* (En el interior

de un vehículo). Las llamadas cortas, son llamadas de duración fija, por lo general de 30 segundos o 1 minuto, dependiendo de los requerimientos de la prueba, con el fin de analizar los eventos que puedan generarse en el transcurso de las mismas, y en particular, comprobar la factibilidad de que los usuarios puedan generar llamadas.

Las mediciones fueron realizadas desde el interior de un vehículo en movimiento a una velocidad no mayor a los 50 Km/h, utilizando equipos para drive test 'TEMS Investigation' (Ericsson) conectados a una laptop. Las mediciones para el operador *Movistar* son válidas también para el operador *Alegro*, ya que ambos comparten la misma red de acceso.

En la figura 3.3 se tienen los resultados de las mediciones realizadas en el interior del túnel, y se observa que los operadores de telefonía celular tienen bajos niveles de señal en algunos tramos del recorrido, es decir, niveles menores a los -95 dBm, lo cual no garantiza que los actuales usuarios de la telefonía móvil puedan establecer llamadas. Los datos han sido pos-procesados con el software TEMS Investigation v6.1.2 y obtenidos mediante el software de posicionamiento geográfico MapInfo v8.5.



**Figura 3.3 Niveles de señal en el interior del túnel del cerro El Carmen.**  
**a) Movistar y Alegre b) Porta**

En la figura 3.4 se muestran las mediciones de FER<sup>6</sup> (Tasa de errores de las tramas - Frame Erasure Rate) en el interior del túnel del cerro El

<sup>6</sup> **FER:** La definición de porcentaje de FER (%FER) depende del equipo de drive test que se utilice para realizar la medición. Para el caso del TEMS Investigation de Ericsson, el %FER significa el número de bloques con incorrecto CRC (Verificación redundancia cíclica) de la trama GSM. En general, el FER es la cantidad de tramas erróneas en la comunicación respecto a la trama completa.

Carmen, en donde se observa que en la mayoría del recorrido se tiene un elevado porcentaje de FER, lo cual corrobora la necesidad de una solución de cobertura para el sitio.

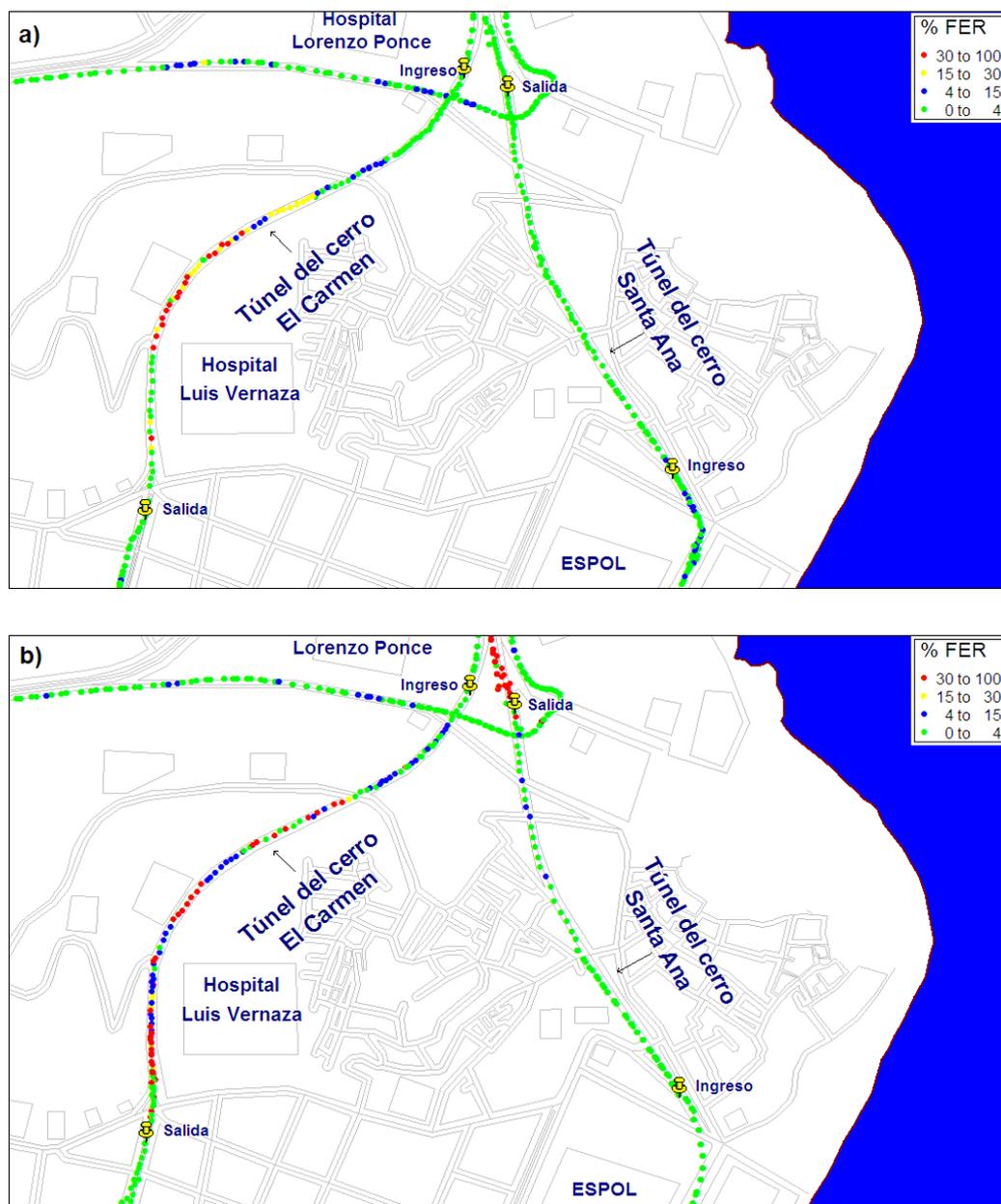


Figura 3.4 Mediciones de %FER en el interior del túnel del cerro El Carmen.  
a) Movistar y Alegre b) Porta

### c) Equipamiento de drive test

El equipamiento de drive test se compone de una computadora (Laptop), tres teléfonos GSM modelo Sony Ericsson T616 con sus respectivas tarjetas SIM (Chip GSM) y cable de datos, un GPS y la licencia para software TEMS.



Figura 3.5 Equipamiento de drive test TEMS (Ericsson)

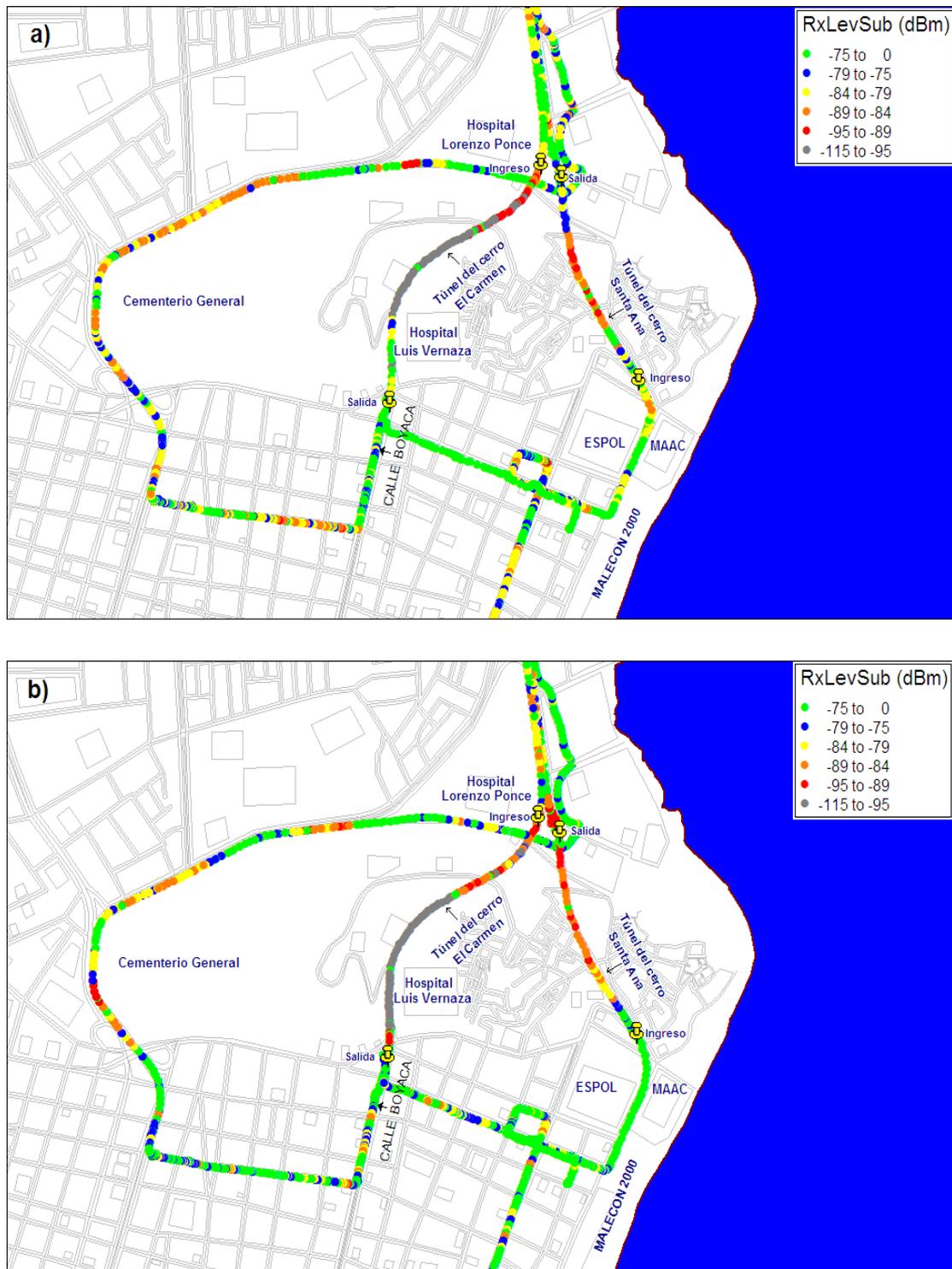
### **3.2.3 Consideraciones en exteriores**

#### **a) Medición de cobertura**

El diseño debe considerar si existe o no cobertura en los exteriores del túnel con el fin de garantizar la continuidad del servicio. En las mediciones realizadas en el campo se corroboró que existe cobertura GSM tanto al ingreso como a la salida del túnel del cerro El Carmen. En la figura 3.6 se muestran las mediciones de niveles de señal para los 3 operadores de telefonía celular del país.

#### **b) Infraestructura al exterior del túnel**

A pesar de que en la etapa de site survey se estudia la factibilidad de la implementación de un DAS, como un paso previo, hay que evaluar si la infraestructura del túnel y la existente a sus alrededores puede contribuir o ser un obstáculo para el desarrollo del proyecto. En las visitas realizadas al túnel se corroboró que si es factible la instalación del diseño de sistemas distribuidos de antenas activo que se propone en este documento.



**Figura 3.6** Niveles de señal en los exteriores del túnel del cerro El Carmen.  
**a) Movistar y Alegro b) Porta**

### 3.3 Diseño propuesto

Para cumplir el objetivo de mejorar la cobertura en el interior del túnel del cerro El Carmen, el diseño de solución para interiores que se propone en la presente tesis es un sistema distribuido de antenas a través de cable de pares trenzados (UTP/ScTP). Algunas de las ventajas de diseñar un DAS de este tipo son:

- Es una solución de fácil despliegue, escalable y de diseño modular.
- Cantidad y dimensiones de los elementos y equipos.
- El cable UTP o ScTP es el tipo de cable estándar de las redes de área local, además es económico, de fácil instalación y en la mayoría de los casos se tiene la infraestructura necesaria para su implementación.
- Cumple con los requerimientos de distancias entre las antenas

Es importante considerar que Alegro comercializa el servicio GSM utilizando como red de acceso a la red de la empresa Movistar bajo un contrato de

arrendamiento por 5 años desde el año 2007, por lo que para efectos del diseño propuesto, el presente trabajo tiene alcance para cualquiera de los tres operadores en la banda de 850, Porta, Alegro y Movistar.

El diseño de cobertura propuesto utilizó la siguiente información:

- Mapas y fotografías del túnel y sus alrededores (Ver anexo C).
- Información de cobertura actual dentro y afuera del túnel (Niveles de señal, %FER, ubicación de celdas, etc.).
- Visitas de reconocimiento al túnel y pruebas de propagación.
- Información y documentación técnica de los equipos LGC Wireless.

### **3.3.1 Esquema general del sistema**

Todo sistema distribuido de antenas celulares se compone de tres elementos básicos que son la fuente de RF, el sistema de distribución y las antenas de cobertura. Las principales diferencias entre DAS son el medio por el cual se propagará la señal de RF (Fibra óptica, cable coaxial, cable UTP/ScTP), el

diseño de cobertura y la tecnología de los equipos elegidos para su implementación. En la figura 3.7 se tiene el esquema general del diseño propuesto.

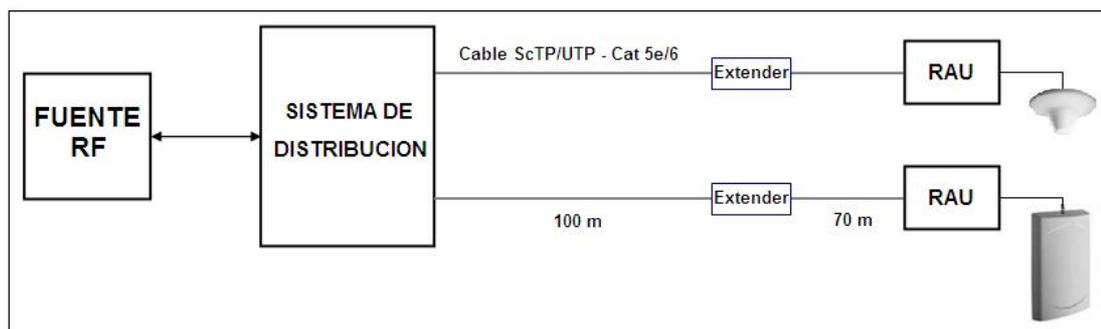


Figura 3.7 Esquema general del sistema

### 3.3.2 Elementos del sistema

#### 3.3.2.1 Sistema de distribución

Como equipo de distribución de señal de RF, se propone el sistema Unison Accel 4x4 Cellular de la empresa LGC Wireless (Anexo D), que consiste de dos elementos:

- j) **Accel Hub 4x4:** Este equipo recibirá la señal de RF desde un repetidor de baja potencia. A su vez, dicha señal de RF será enviada a través del cable UTP/ScTP hacia cada una de las RAU's instaladas en el túnel. La

nomenclatura 4x4 indica que el equipo posee 4 puertos para conectar hasta 4 RAU's.

**k) Remote Access Unit (RAU):** Este equipo recibe las señales de RF provenientes desde el Accel Hub, a través del cable estructurado, en frecuencia intermedia, y las convierte nuevamente a la frecuencia correspondiente. A continuación, cada RAU será conectada a su correspondiente antena de cobertura a través de un jumper coaxial de una longitud máxima de 1 metro.



**Figura 3.8** Accel Hub y RAU

### **3.3.2.2 Fuente de RF**

Como equipo fuente de RF, será utilizado un sistema de antena donora y repetidor de baja potencia. El sistema se detalla a continuación:

a) **Repetidor:** El repetidor considerado es el MR853D de la empresa Andrew (Ver anexo D), el cual recibirá la señal de RF desde una antena donora (Antena yagi) ubicada en el exterior del túnel. Luego, dicha señal será conectada al sistema de distribución, específicamente a la unidad Accel Hub, a través de un jumper coaxial de 1 metro aproximadamente.

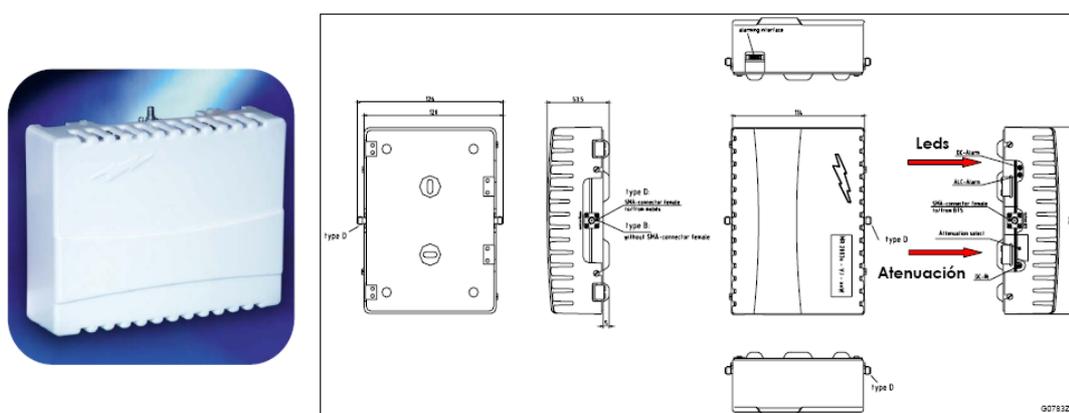


Figura 3.9 Repetidor usado como fuente de RF

b) **Antena Donora:** Como antena donora se propone una antena ‘Yagi’ de 10-15 dBi’s que captará la señal proveniente de las BTS’s servidoras (Ver figura 2.14). Asimismo, la orientación de la antena donora privilegiará al mejor servidor (BCCH con el mejor nivel de señal) y se conectará al repetidor a través de un tendido de cable coaxial. Por lo general, la antena yagi va montada sobre un soporte o mástil galvanizado de 1 a 5 metros según los requerimientos de diseño y cobertura.

### 3.3.2.3 Antenas de cobertura

Como antenas de cobertura se considera una antena omnidireccional de 3 dBi de ganancia y una antena tipo panel de 7 dBi de ganancia (Ver anexo A). Con el fin de no desarmonizar con la simetría y arquitectura de los elementos instalados en el túnel (Luminarias, sensores, señalética, etc.) las antenas consideradas tienen un diseño, tamaño y color que disminuye el impacto visual, de manera que sean poco percibidas por las personas.



Figura 3.10 Antena omnidireccional montada en el cielo falso

### 3.3.3 Diagrama de conexión

A continuación en la figura 3.11 se muestra el diagrama de conexión del proyecto de mejoramiento de cobertura celular dentro del túnel del cerro El Carmen.

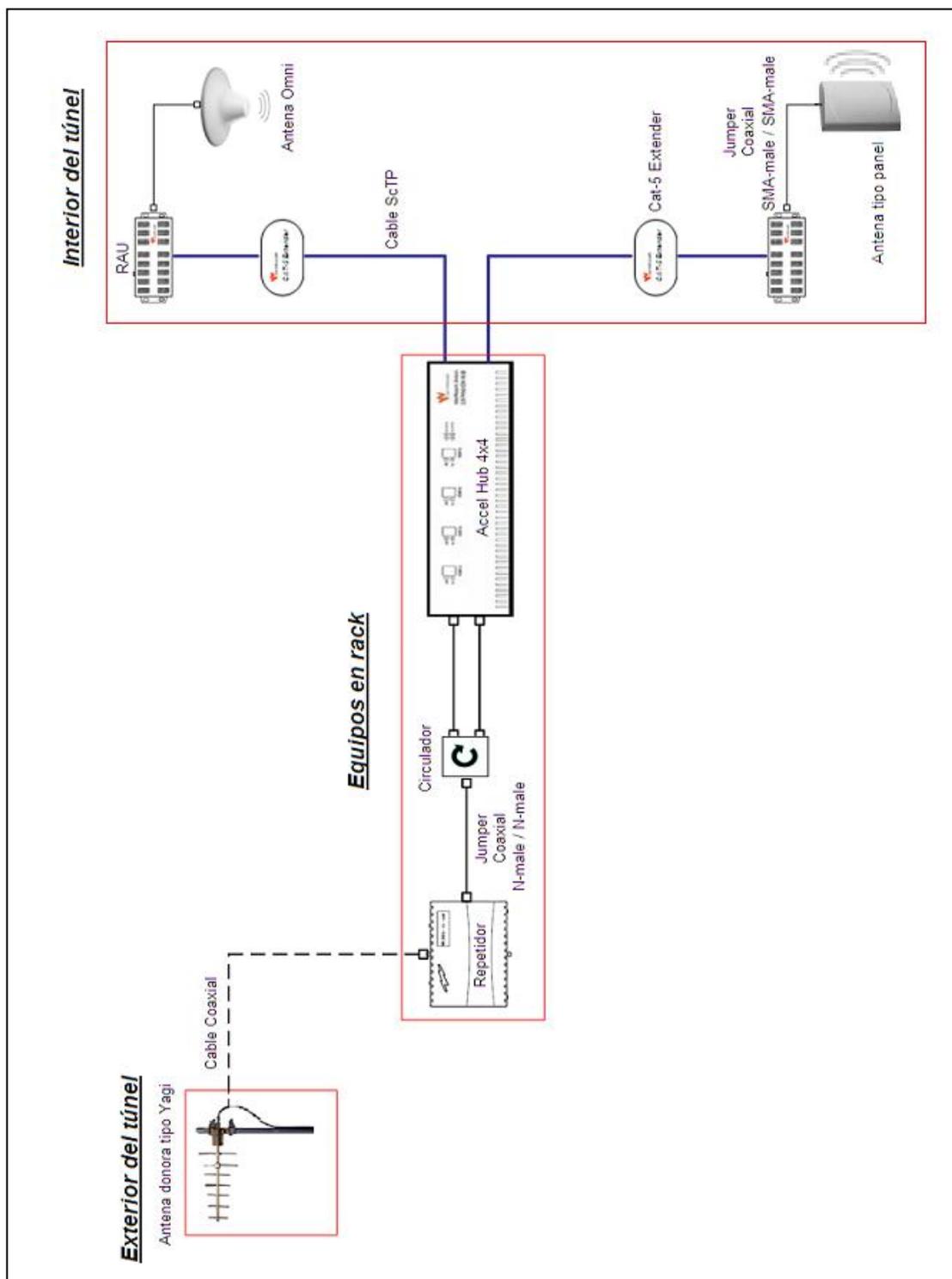


Figura 3.11 Diagrama de conexión del sistema de antenas distribuidas para el túnel del cerro El Carmen

### 3.3.4 Site survey en el túnel

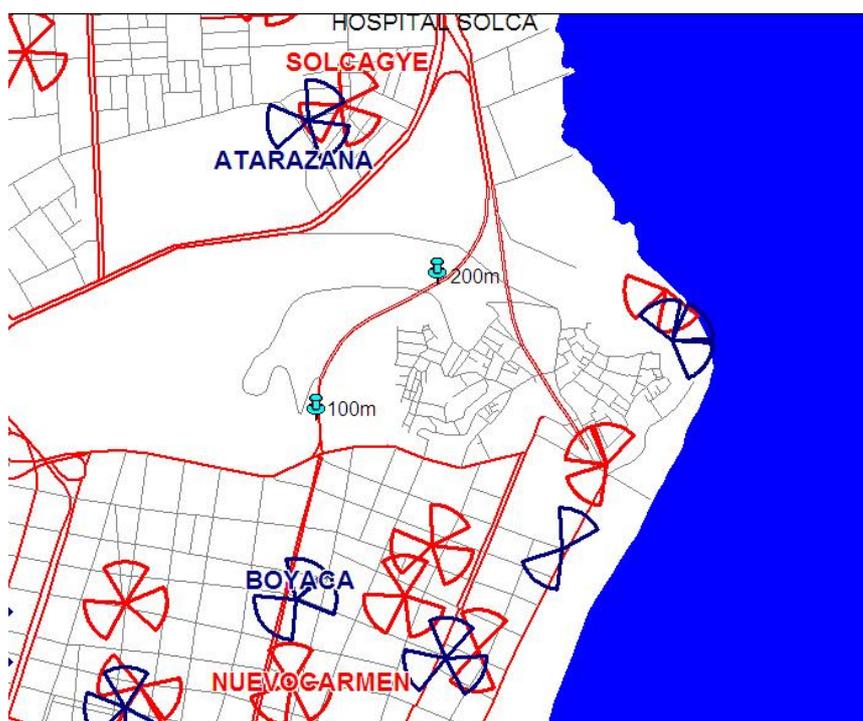
Luego de establecer el diseño del DAS se debe evaluar la factibilidad de la instalación de los elementos en el interior del túnel, la ubicación y posición de los mismos.

Como se vio en el apartado 3.2.1 el túnel del cerro El Carmen tiene una longitud aproximada de 750 metros y un trazado que comprende 2 curvas y una sección recta con sentido vehicular de norte a sur. Las coordenadas geográficas al ingreso del túnel son latitud  $2^{\circ}10'42.41''S$ , longitud  $79^{\circ}52'43.56''O$  y a la salida del túnel las coordenadas son latitud  $2^{\circ}11'1.17''S$ , longitud  $79^{\circ}52'56.38''O$ .

De la evaluación del ambiente de radio con las pruebas de drive test se tiene que los operadores de telefonía celular poseen cobertura desde el ingreso del túnel hasta 200m aproximadamente y en los últimos 100m hacia la salida. En la figura 3.12 se indican las estaciones bases de los operadores porta y movistar que son los mejores servidores al interior del túnel, y de las cuales se puede recibir la señal para el sistema fuente de RF.

Se sugiere que la instalación de los equipos y antenas sea en su totalidad al interior del túnel, ya que es la ubicación más adecuada, factible, de menor

complejidad y se pueden utilizar las estructuras de la iluminación y las paredes del túnel. Los equipos elegidos podrían instalarse en bastidores (Racks) o en las paredes (Empotrados) y las antenas yagi y de cobertura junto a las lámparas de iluminación.



**Figura 3.12** Estaciones bases mejores servidores al interior del túnel

De esta manera, la antena yagi estaría a 150m sujeta a un mástil o soporte, en caso de ser necesario, y orientada hacia el ingreso del túnel de donde recibiría la señal de las estaciones base GSM. Los equipos pueden ubicarse también sobre la estructura de iluminación del túnel a una distancia no mayor a 50m de la antena yagi, para evitar las pérdidas de señal a través del

recorrido del cable coaxial. La primera antena de cobertura (Omnidireccional) se encontrará a 100m de los equipos y la segunda antena de cobertura (Tipo panel) con su respectiva RAU a 150m de distancia de la primera, con lo que el túnel quedaría completamente con cobertura celular.

En el interior del túnel se cuenta con energía eléctrica por lo que en cualquier punto del mismo se puede obtener la alimentación de energía necesaria para los equipos. El alquiler del espacio físico para la ubicación de todo el equipamiento se tendría que negociar con el Municipio de Guayaquil.

En la figura 3.13 se muestra un fotomontaje de la posible ubicación de los equipos sobre la estructura de la iluminación del túnel que se encuentra a 4m de altura aproximadamente. Se ha aumentado el tamaño de los elementos para que puedan ser apreciados en el gráfico.

En la figura 3.14 se muestran las ubicaciones recomendadas del equipamiento, considerando los requerimientos de site survey en general y las distancias apropiadas, para cumplir con los objetivos de cobertura. El diseño es sustentado básicamente mediante pruebas de propagación como se verá más adelante en el apartado 3.5.

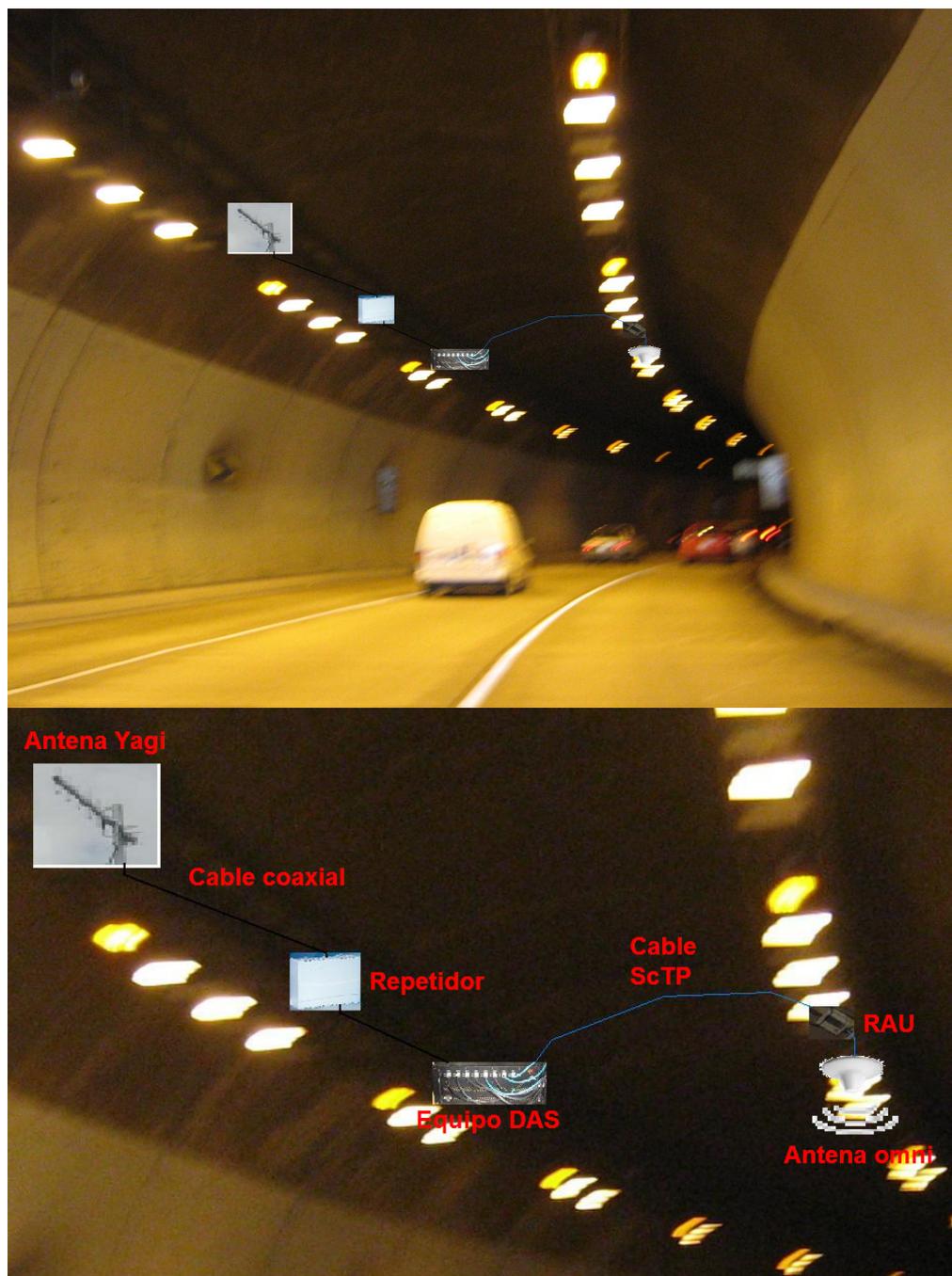
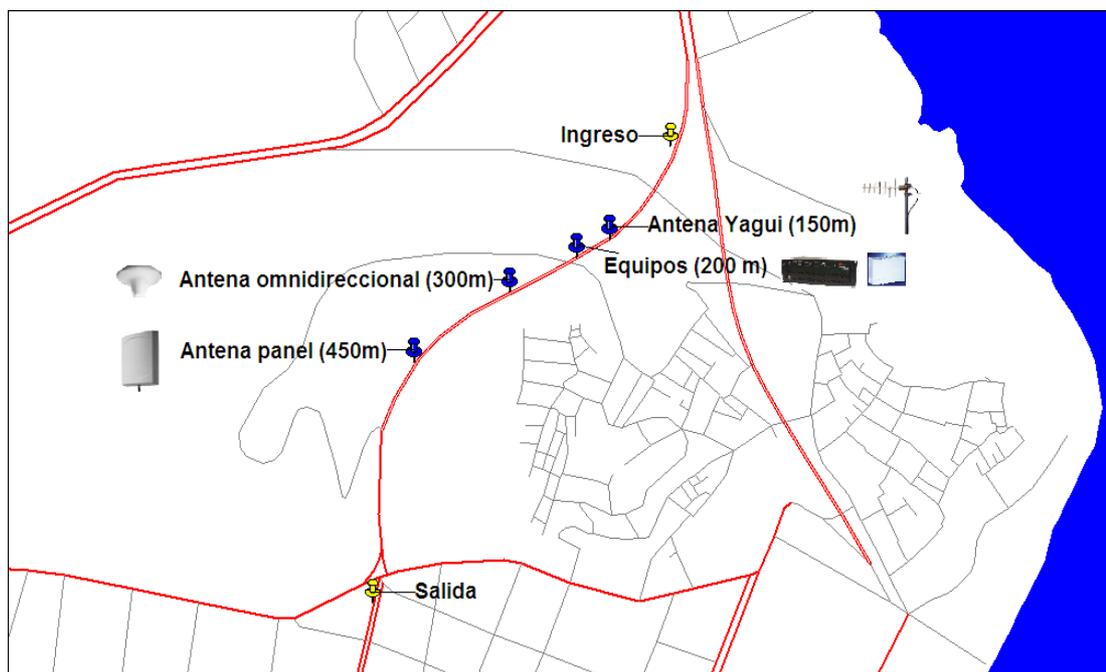


Figura 3.13 Fotomontaje del DAS propuesto



**Figura 3.14** Ubicaciones de los elementos

### 3.4 Cálculo de nivel de señal

A pesar de que el diseño propuesto del presente documento se sustenta únicamente con pruebas de propagación para el ambiente de RF (Cobertura estimada), es importante realizar los cálculos teóricos del nivel de señal que se tendría en la entrada del DAS, es decir, a la salida del sistema repetidor, y considerando que en todas las antenas de cobertura (Sistema RAU-Antena) se tendría el mismo nivel de potencia que ofrece el equipo Unison Accel 4x4 Cellular de la empresa LGC Wireless (Ver anexo D).

A continuación se muestra el cálculo con las consideraciones de diseño para el sistema propuesto:

### Calculo estimado de niveles de señal

Atenuación del cable coaxial tipo heliax 1/2"	-0.11 dB, 900 MHz, 1m	
Nivel de señal a nivel del suelo	-80.00 dBm	
Nivel de señal en la antena yagi (Antena Donora)	-70.00 dBm	
Ganancia antena yagi	15.00 dBi	
Pérdidas por longitud cable coaxial Conexión antena yagi-repetidor (50m)	-5.50 dB	
Pérdidas por conectores	-0.50 dB	
	<i>-61.00 dBm</i>	
Ganancia del repetidor	70.00 dB	(Atenuación aprox 2 dB)
Ganancia del repetidor final	68.00 dB	
	<i>7.00 dBm</i>	
Pérdidas por longitud cable coaxial Conexión repetidor-equipos DAS (1m)	-0.11 dB	
Pérdidas por conectores	-0.50 dB	
	<i>6.39 dBm</i>	
Ganancia del equipo DAS	15.00 dB	
<b>Salida del DAS</b>	<b>21.39 dBm</b>	

Del resultado de los cálculos se tiene que 21 dBm sería el nivel de potencia a la salida del equipo DAS, el cual está dentro del rango aceptable para el óptimo funcionamiento de todo el sistema

### **3.5 Pruebas de campo**

El diseño propuesto en esta tesis se sustenta mediante pruebas de propagación con recolección de medidas, para estimar la cobertura al interior del túnel del cerro El Carmen de Guayaquil. En estas pruebas de campo se tiene en cuenta las características del túnel (Dimensiones, trazado y longitud) y las características relacionadas con las antenas (Posición, ganancia, polarización y frecuencia) y del equipamiento en general.

Para las pruebas se utilizó un transmisor de onda continua que opera en el rango de frecuencias de 805-960 MHz (Banda de 850 MHz). El transmisor está formado por un generador de portadora y un amplificador de potencia de 0.1 - 20 Watts (+20 a +43 dBm's) en pasos de 1dB. Como elementos radiantes se emplearon de manera alternada una antena omnidireccional y una antena tipo panel, polarizadas verticalmente con ganancias de 3 y 7 dBi's respectivamente (Ver anexo A).

La recolección de datos (Medición de señal con unidad de referencia en dBm) se realizó en distintos puntos del túnel con un equipo Agilent que comprende el software, la antena con una ganancia de 3 dBi y el receptor conectado a una laptop. En el anexo E se pueden observar varias fotos de la prueba de propagación.

Además, se necesitaron dos vehículos, uno para el equipamiento de propagación de señal y otro en desplazamiento para la recolección de medidas. El transmisor fue colocado en la parte de atrás de una camioneta y se energizó con un inversor, en este mismo vehículo se montó sobre un mástil el elemento radiante (Antena) obteniendo la altura aproximada de la colocación sugerida de las antenas de cobertura en el interior del túnel (Ver figura 3.15).

La frecuencia de la banda de 850 MHz que se seleccionó en el transmisor para realizar la prueba de propagación fue el canal 780, que corresponde a los 893,4 MHz del espectro radioeléctrico. La potencia de salida del transmisor fue de 20 dBm (0.10 Vatios), que corresponde a la potencia de salida que se tendría en cada una de las RAU-Antenas del equipo DAS sugeridos para su implementación y que a la vez considera el peor de los casos lo cual garantiza el diseño del sistema.



**Figura 3.15 Equipamiento transmisor**

En el segundo vehículo se armó el equipo de medición Agilent que permite recolectar la información de recepción de niveles de señal a lo largo del túnel (Ver figura 3.16).



**Figura 3.16 Equipamiento receptor**

Cabe recalcar que las pruebas fueron realizadas un día domingo a las 7 AM cuando el tráfico vehicular por el túnel es mínimo, para evitar inconvenientes con las autoridades de tránsito y obstrucción vehicular.

### **3.6 Análisis y resultados**

Se realizaron las mediciones al interior del túnel considerando las dos posiciones sugeridas en el site survey de las antenas de cobertura, esto es, que el transmisor fue colocado a 300 y 450 metros del ingreso del túnel mientras un segundo vehículo se desplazaba con el equipamiento receptor recolectando la información de los niveles de señal recibidos.

Luego del pos-procesamiento de la información obtenida en la prueba de campo se tienen los resultados de las mediciones, los cuales son mostrados en la figuras 3.17 y 3.18. En la figura 3.17 únicamente se muestran los niveles de señal de la cobertura que ofrecerían las antenas (Transmisor) al interior del túnel. En la figura 3.18 se muestra la cobertura estimada que se tendría para cada operador de telefonía celular considerando la cobertura ofrecida actual por cada uno y el resultado de las mediciones realizadas.

Como resultado final se tiene, que si se implementase el diseño del sistema de antenas distribuidas propuesto, la distribución de cobertura presentaría mejores niveles de señal con valores promedio mejores o iguales al rango de -60 a -80 dBm's, que el patrón de cobertura actual al interior del túnel (Ver figura 3.3). De esta manera se demuestra que el DAS propuesto solventaría los problemas de cobertura que hay actualmente con el servicio de telefonía

celular GSM en el interior del túnel del cerro El Carmen y garantizaría la comunicación a los usuarios de cualquier operador del país.

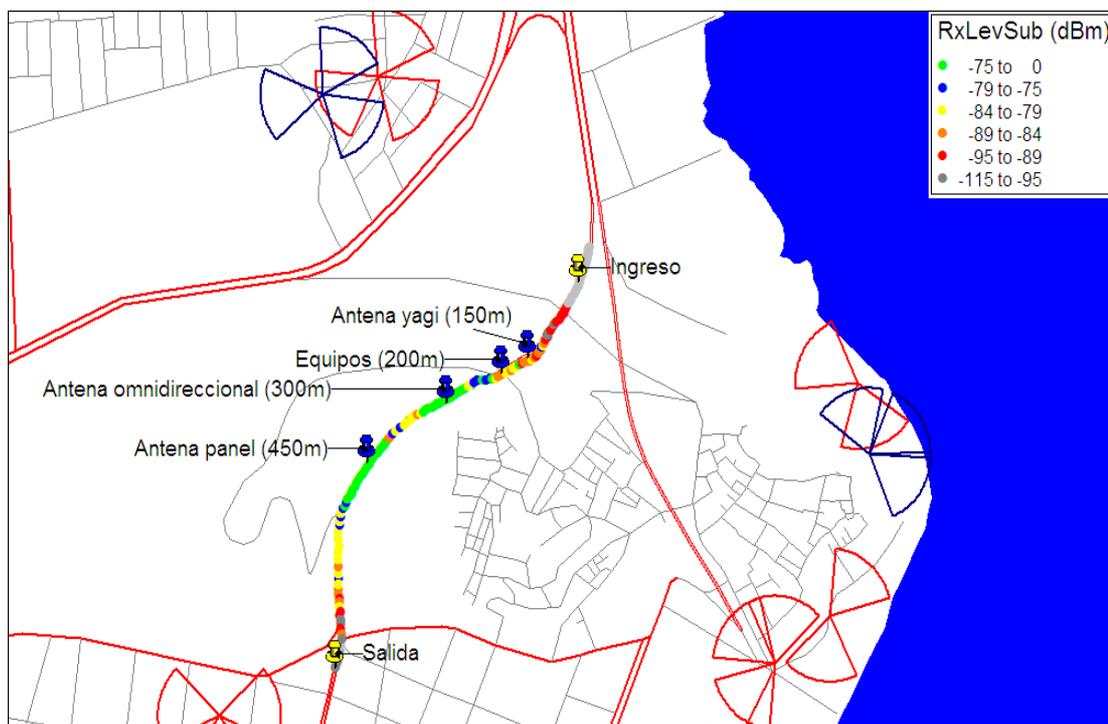
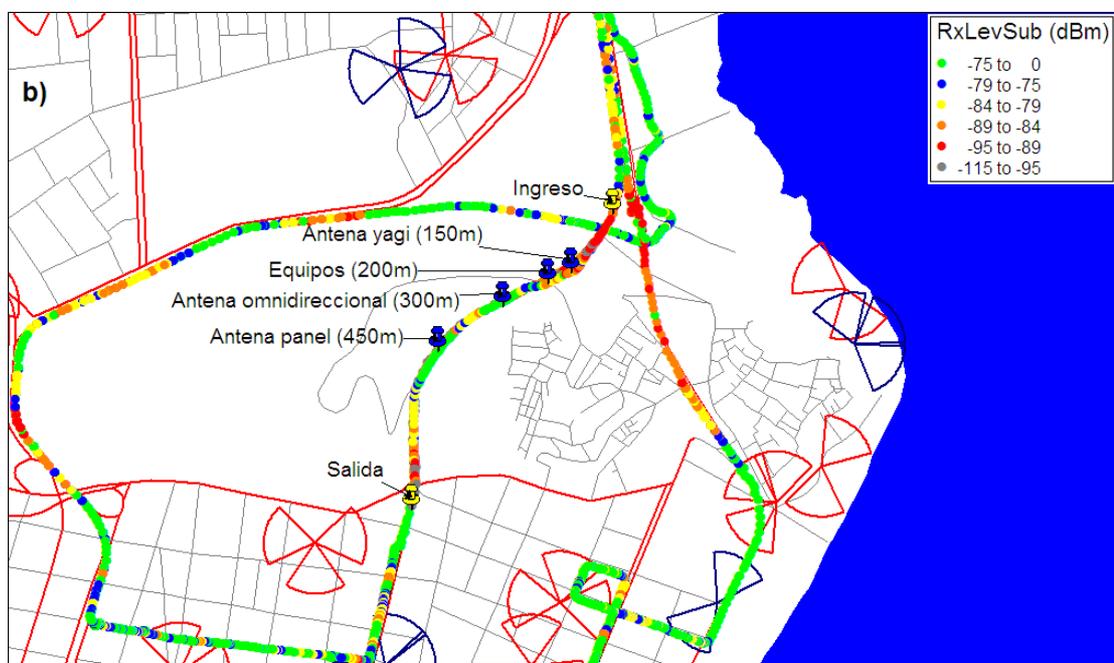
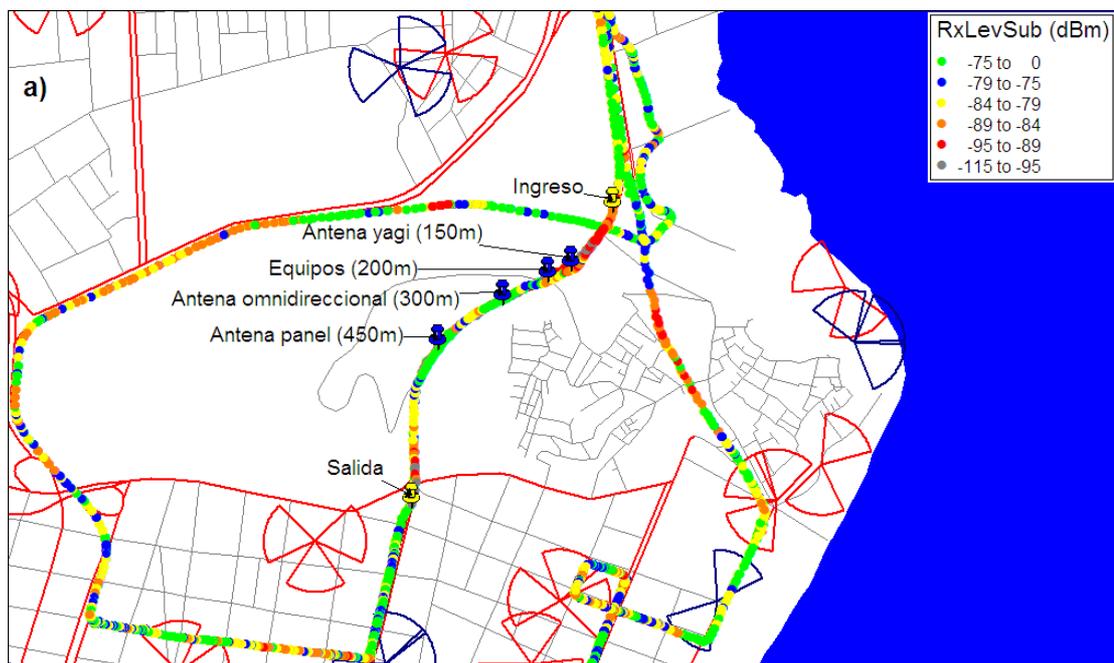


Figura 3.17 Niveles de señal estimados del DAS al interior del túnel del cerro El Carmen



**Figura 3.18 Niveles de señal estimados del DAS más la cobertura actual.**  
**a) Movistar y Alegro b) Porta**

# CAPÍTULO 4

## ESTUDIO ECONÓMICO

### 4.1 Consideraciones iniciales

El objetivo de este capítulo es entregar información relacionada con los costos del personal, equipamiento e infraestructura que permitirán implementar el sistema distribuido de antenas para el túnel del cerro El Carmen.

En cuanto a los equipos para el DAS se ha considerado al proveedor 'Milestone Technologies', ya que en el mercado ecuatoriano son los únicos distribuidores que cuentan con equipos de la marca LGC Wireless que permiten distribuir la señal de RF a través de cable UTP. Para el proyecto se asume que el equipo DAS es nuevo y proporcionado e instalado por Milestone Technologies, como requisito para considerar la garantía del equipo. Las operadoras celulares, Porta, Movistar y Alegro son los

potenciales clientes para implementar la solución propuesta en esta tesis, y los beneficiarios finales serían todos sus usuarios.

## **4.2 Análisis FODA**

### **a) Fortalezas**

- La presencia de cobertura en el interior de un túnel le permite al operador garantizar la comunicación a sus usuarios para el acceso a los servicios de números de emergencia, seguridad, asistencia, y otros.
- Disponibilidad de una infraestructura que puede facilitar la escalabilidad hacia redes 3G, así como también, la compatibilidad y coexistencia con otros estándares.
- El impacto ambiental y visual que se genera del desarrollo de este proyecto es moderado.
- El costo de implementar este tipo de solución para ambientes interiores es más bajo que el costo total de integrar una radiobase GSM a la red.

**b) Oportunidades**

- La posibilidad de que las empresas de telefonía móvil del país puedan compartir la infraestructura del proyecto, de tal manera que se puedan reducir los costos.
- Captación de tráfico celular retenido de los usuarios, considerando la alta demanda del servicio que se tiene en la ciudad de Guayaquil, lo que permitirá al operador generar ingresos adicionales gracias a las llamadas que se pueden cursar y mantener.
- Extender la cobertura de la telefonía celular dentro de las áreas de servicio.
- Implementación de un proyecto de este tipo para otros túneles y estructuras similares del país.
- Como parte de una estrategia del negocio, el operador puede mostrar a los clientes su liderazgo en el servicio de telefonía celular, siendo los primeros en ofrecer cobertura en túneles.

**c) Debilidades**

- En el diseño propuesto solo se ha considerado la tecnología GSM.
- La presencia en el mercado de otro tipo de soluciones, tales como, sistemas de cobertura basados en fibra óptica, cable radiante, cable coaxial, etc.
- En caso de reparaciones o mantenimientos habrá pérdida del tráfico, ya que el sistema estará fuera de servicio.
- Debido a que la fuente de RF del sistema es un repetidor no se está brindando capacidad adicional a los usuarios.

**d) Amenazas**

- Desastres naturales, accidentes de tránsito, atentados, fallas de energía, problemas comunitarios, etc.
- Leyes de tránsito, ordenanzas y permisos municipales.

- En caso de que se desee tener exclusividad de cobertura en túneles hay un costo adicional que deberá ser analizado por el operador.

### **4.3 Costos de personal**

Para la instalación no se necesita contratar personal adicional, ya que junto al contrato de compra de los equipos, el proveedor se compromete con la instalación completa del sistema distribuido de antenas y a la evaluación del servicio del mismo, con la posibilidad de que se incluyan los servicios de ingeniería y de diseño. La garantía que se ofrece por el trabajo realizado y los equipos es de 12 meses. El tiempo de entrega de los equipos y materiales es de 30 días laborables considerando la fabricación e importación. Para la instalación se considera un periodo máximo de 5 días, una vez que el proveedor cuente con los permisos por parte del operador.

Para los mantenimientos preventivos y correctivos del DAS, se necesita mínimo de un técnico de telecomunicaciones. En las empresas de telefonía celular, el área de Operación y Mantenimiento (O&M) generalmente dispone de técnicos capacitados para trabajar con todos los equipos, ó subcontratan los servicio bajo la modalidad 24/7. De este modo y ya que los técnicos no son contratados únicamente para trabajar en el DAS sino en todos los elementos de la red, este costo no es considerado en la tabla II; sin embargo,

se presenta el caso más general, la contratación de un técnico en telecomunicaciones para el mantenimiento del DAS.

- Técnico en telecomunicaciones

Mensualidad fija anual: \$ 9600.00

Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Total
Servicios: Incluye la instalación del equipo, cableado y antenas. Configuración y puesta a punto del sistema.	1	\$2 390.00	\$2 390.00
Servicios de ingeniería	1	\$390.00	\$390.00
<b>Costo de personal</b>			<b>\$2 780.00</b>

Tabla II Costos de personal

#### 4.4 Costos de equipos y materiales

En las tablas III, IV, V y VI se detallan los costos de cada uno de los componentes del proyecto, y en el anexo F se pueden observar las respectivas cotizaciones.

Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Total
Unison Accel Hub 4 puertos	1	\$4 758.28	\$4 758.28
Unison 800 MHz TDMA/CDMA/GSM remote access unit	2	\$1 218.96	\$2 437.92
Unison Cat-5/6 Extender	2	\$564.72	\$1 129.44
Repetidor celular	1	\$3 000.00	\$3 000.00
<b>Costo de equipos</b>			<b>\$11 325.64</b>

**Tabla III Costos de equipos**

Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Total
Micro omnidireccional 3 dBi's	2	\$84.33	\$168.66
Antena tipo Yagi (Incluye kit de instalación)	1	\$190.00	\$190.00
Soporte / Mástil para antena Yagi	1	\$30.00	\$30.00
Cable, Coax MHUB - 20ft N-Male to N-male	1	\$87.33	\$87.33
Cable assy, N-male to N-male, 30", RG142	2	\$43.66	\$87.32
Circulator, 790-960MHZ	1	\$291.09	\$291.09
Jumper, SFF 1.5, N-Male and SMA-Male, length 1 meter	2	\$32.88	\$65.76
<b>Kit de instalación: Incluye cable ScTP para conexión Hub - Rau (400 m), tubería PVC para protección del cable, rack cerrado para pared, y accesorios y materiales menudos de instalación.</b>	1	\$998.00	\$998.00
<b>Costo de accesorios RF y materiales de instalación</b>			<b>\$1 918.16</b>

**Tabla IV Costos de accesorios RF y materiales de instalación**

Otros valores que deben ser considerados para el proyecto son: El alquiler de las áreas en donde se ubicarán los equipos, el consumo mensual de la energía eléctrica para la operación del sistema y los permisos municipales.

Generalmente las empresas de telefonía celular contratan el espacio físico para los equipos de acorde a la disponibilidad y a sus necesidades, y cualquier obra civil adicional que se tenga que realizar corre por cuenta del operador, así como también la implementación de la seguridad y vigilancia.

Por ser el túnel un bien de uso público, bajo la administración y jurisdicción de la M.I. Municipalidad de Guayaquil, durante el trámite de la obtención de los respectivos permisos municipales para que el sistema pueda ser implementado, se deben negociar todos los valores y la forma de pago por la utilización del túnel respecto al recorrido del cable y las antenas, quedando esto a consideración del operador.

Además, el operador deberá contar con su propio sistema de acometida y medidor de energía eléctrica, considerando para esto un valor mensual de consumo, aunque en el contrato de arrendamiento se puede llegar a un convenio en el que se establezca que la energía eléctrica sea proporcionada por el dueño del predio. También se tiene que analizar la necesidad de instalar un sistema de respaldo de energía.

Descripción	Frecuencia	Costo
Arriendo*	Mensual	\$500.00
Energía eléctrica*	Mensual	\$150.00
Obra civil inicial. No incluida en la instalación*	-	\$1 000.00
* Valores promedios estimados		
<b>Costo adicional</b>		<b>\$1 650.00</b>

**Tabla V Costos adicionales**

Personal	2 780.00
Equipos	11 325.64
Accesorios y Materiales	1 918.16
Otros	1 650.00
<b>Costo total inicial del proyecto</b>	<b>\$17 673.80</b>

**Tabla VI Resumen de costos**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **CONCLUSIONES**

1. De las mediciones de cobertura realizadas se tiene que actualmente los tres operadores tienen bajos niveles de señal, es decir, niveles menores a los -95 dBm, en algunos tramos del túnel, lo cual no garantiza que los usuarios de la telefonía móvil puedan establecer llamadas, por lo que para garantizar la cobertura en el interior del túnel se requiere implementar una solución para interiores.
  
2. El sistema distribuido de antenas propuesto en esta tesis posee algunas ventajas comparado con los DAS pasivos, de entre las cuales las más importantes son: iguales niveles de potencia en todas las antenas de servicio, mayor distancia de cobertura, menor impacto visual y la facilidad de instalación del cableado y del equipamiento en general.
  
3. Uno de los beneficios más relevantes de implementar un DAS es que permiten incrementar el tráfico, ya sea este tráfico nuevo o retenido, además de las ventajas competitivas, sobretodo desde el punto de vista de las estrategias de mercadeo con el fin de atraer más usuarios,

ofreciendo mejor cobertura, calidad de servicio y acceso a todos los servicios asociados a GSM.

4. Con la implementación del DAS propuesto, se garantizaría la continuidad de cobertura y el servicio de la telefonía celular al interior del túnel del cerro El Carmen para los 3 operadores del país.
  
5. El método presentado en este proyecto para sustentar el diseño propuesto, da la ventaja a los ingenieros de RF de poder tener estimaciones más reales, a pesar de la dificultad de la movilización del equipamiento, más que nada cuando no se dispone de software con modelos ajustados para la propagación en el túnel de interés. Adicionalmente, las mediciones recolectadas pueden servir para *model tunneling* (Afinación o ajuste de modelos de propagación) con algunos software de predicción, siguiendo el procedimiento adecuado y contando con las licencias necesarias, pero lo cual implica una mayor inversión.
  
6. El presente documento puede contribuir para el despliegue de sistemas distribuidos de antenas en las diferentes estructuras tipo túnel a nivel nacional ya que se establecen los lineamientos generales para la planificación y diseño de los DAS.

7. Implementar este DAS es una alternativa técnico-económica viable para que los operadores celulares desplieguen su red en sitios en donde la cobertura se encuentra disminuida por motivos de topología, infraestructura o bajo tráfico.
8. El costo inicial presupuestado para implementar un proyecto de esta clase es económicamente aceptable para los operadores de telefonía celular, comparado con otros proyectos de expansión de cobertura similares, así como también, los costos de operación y mantenimiento.
9. Como conclusión final se tiene que se ha cumplido con el objetivo principal de esta tesis de grado que es diseñar una solución efectiva y práctica para garantizar la cobertura celular GSM en la totalidad del túnel del cerro El Carmen de la ciudad de Guayaquil.

## **RECOMENDACIONES**

1. En caso de ser necesario obtener mayores niveles de potencia se puede considerar en el diseño un repetidor celular de media potencia (2 Vatios) en vez del repetidor de baja potencia (0.5 Vatios).
  
2. Si por cuestiones de capacidad las estaciones bases cercanas al túnel del cerro El Carmen poseen canales en la banda de 1900 MHz o si los operadores desplegasen otros estándares de redes celulares, en el diseño se deberá considerar la inclusión de estas capas con una cantidad de equipamiento adicional o configurables para este fin.
  
3. Al momento de diseñar la distribución de las antenas, es muy importante tener en cuenta la idea de cómo se va a propagar la señal en el sitio en donde se desplegará el sistema, con esto se busca brindar buenos niveles de señal en el interior de la edificación.
  
4. Al implementar el diseño propuesto es necesario hacer pruebas de drive test posteriores con el fin de evaluar el óptimo funcionamiento del servicio de telefonía celular al interior del túnel, además de realizar

un correcto ajuste inicial de parámetros de la celda donora, y también, corroborar el funcionamiento de los handovers entre las celdas involucradas de la red.

5. Para la implementación de un proyecto de este tipo en otros túneles es importante tener en cuenta que únicamente se han sugerido los elementos y el equipamiento adecuado para obtener un óptimo desempeño de la comunicación en el túnel del cerro El Carmen, lo cual no implica una generalización para todos los casos.

# **ANEXOS**

## ANEXO A.1: Antena omnidireccional

### Omni Multi-banda Polarización Vertical

806-960    1425-3600    5150-6000

**KATHREIN**  
MOBILCOM BRASIL

V

La antena puede ser operada en todos los rangos de frecuencia simultaneamente.  
Las antenas no necesitan de puesta a tierra adicional.

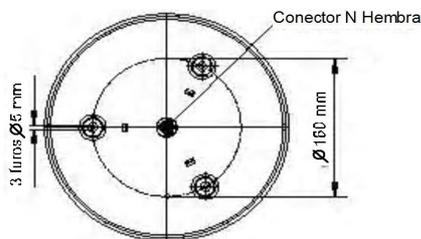
#### Indoor 360° Polarización Vertical 806-960/1425-3600/5150-6000 2dBi

Descripción	800 10249
Rango de frecuencia	806 - 960 MHz 1425 - 3600 MHz 5150 - 6000 MHz
Polarización	Vertical
Ganancia	2 dBi
Entrada	Conector N hembra
VSWR	806 - 960 MHz < 1,5 1425 - 1710 MHz: < 1,8 1710 - 2200 MHz: < 1,4 2200 - 3600 MHz: < 1,5 5150 - 6000 MHz: < 1,8
Conector	N hembra
Impedancia	50 Ohms
Potencia máxima de entrada	50 Watt (temperatura ambiente 50°C)
Peso	466 g
Diámetro	258 mm
Alto	94 mm (sin conector)
Dimensión del embalaje	277 x 277 x 169 mm

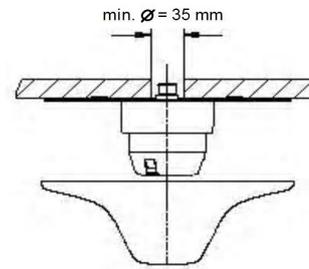


800 10249

- Material:** Base: Aluminio.  
Radomo: Plastico de alto impacto.  
Cor: Blanca.  
Todos los tornillos y arandelas son en acero inoxidable.
- Montaje:** Tres puntos en la base que permiten el montaje en el techo.  
Son fonecidos dos tipos de tornillos.  
Para el conector N se necesita de un punto en el techo con diámetro de 35 mm.
- Puesta a tierra:** Todas las partes son en laton como los conductores internos, son puestas a tierra en DC.
- Accesorio:** Splitters (divisores de potencia 800 - 2500 MHz ).



1093050206



Después de instalar la antena a través de 3 tornillos de montaje, poner la capa de protección.

## ANEXO A.2: Antena tipo panel

**Panel Multi-banda**  
**Polarización Vertical**  
**Abertura Horizontal**  
**Combinador Integrado**

806-960	1710-2500
V	V
90°	90°
C	

**KATHREIN**  
 MOBILCOM BRASIL

### Indoor 90° Polarización Vertical 806-960/1710-2500 7dBi

Descripción	800 10248
Rango de frecuencia	806 - 960 MHz / 1710 - 2500 MHz
Polarización	Vertical
Ganancia	7 dBi
Abertura horizontal	90°
Entrada	Conector N Hembra
VSWR	806 - 960 MHz 2 1710 - 2500 MHz: < 2,0
Conector	Cabo RG 223/CU de 1 m de compr., blanco con conector N Hembra
Impedancia	50 Ohms
Potencia máxima de entrada	50 Watt ( temperatura ambiente de 50° C )
Peso	500 g
Diametro	258 mm
Alto	94 mm (sin conector)
Dimensión del embalaje	363 x 152 x 62 mm

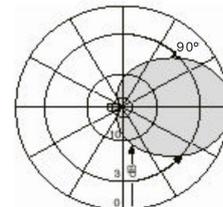
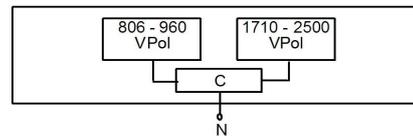
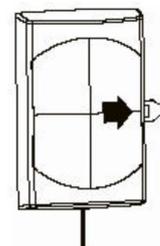
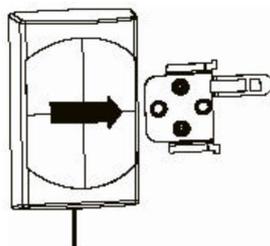
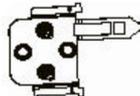


Diagrama horizontal

- Material:** Base: Aluminio.  
 Radomo: Plastico de alto impacto.  
 Cor: Blanca  
 Todos los tornillos y arandelas son en acero inoxidable.
- Montaje:** Tres puntos en la base que permiten el montaje en el techo. Son fornecidos dos tipos de tornillos. Para el conector N si necesita de un punto en el techo con diametro de 35 mm.
- Puesta a tierra:** Todas las partes son en laton como los conductores internos, son puestas a tierra en DC.
- Accesorio:** Splitters ( divisores de potencia 800 - 2500 MHz ).

#### Montaje:g:



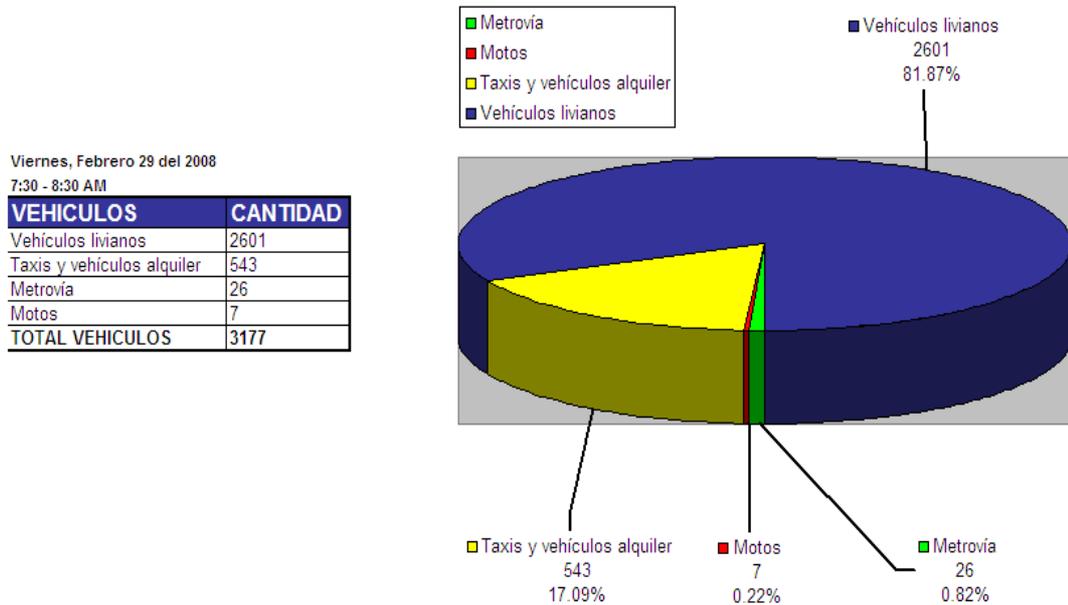
Fije la chapa de acoplamiento en la pared en la posición indicada, usando 2 tornillos con 4 mm de diametro

Aliar la atena encima de la chapa de acoplamiento

Tirar la atena hasta oir un click del encaje.

1093050205

## ANEXO B: Tráfico vehicular en el túnel del cerro El Carmen



Tráfico vehicular medido en la hora pico (7:30 – 8:30 AM) cuando un gran porcentaje de los habitantes del sector norte de Guayaquil se desplazan hacia el centro y sur de la ciudad. La medición fue realizada al ingreso del túnel y se clasificó en vehículos de alquiler, livianos, motos, transportación (Metrovía). El total de vehículos contados en ese día fue de 3177.

Si se realiza una proyección considerando en un día laboral (Lunes a Viernes) las 4 horas picos del día (7-9 AM y 5-7 PM), las horas no pico (6-7 AM, 9 AM-5 PM y 7-10 PM) y las horas de poco tráfico (12-6 AM y 10-12

PM), se tendría la cantidad de 25000 vehículos aproximadamente que utilizan el túnel del cerro El Carmen, los cuales son potenciales usuarios de telefonía móvil incluidos los conductores, ya que la actual ley orgánica de transporte terrestre le permite a los conductores hablar por teléfono celular siempre y cuando se utilice el dispositivo de manos libres adecuado.

	Horario	Cantidad horas	% Vehículos respecto a la hora pico	Cantidad vehículos por hora	Cantidad vehículos total
Horas pico	7-9 AM y 5-7 PM	4	100%	3000	12000
Horas no pico	6-7 AM, 9 AM-5 PM y 7-10 PM	12	35%	1050	12600
Horas de poco tráfico	12-6 AM y 10-12 PM	8	3%	90	720

<b>Total diario vehículos (Aprox.)</b>	<b>25320</b>
----------------------------------------	--------------



**Tráfico vehicular a la entrada-salida del túnel del cerro El Carmen**

**ANEXO C: Fotos del túnel del cerro El Carmen**

- Fotos de una maqueta del túnel del cerro El Carmen



- Fotos de Google Earth

a) Ingreso al túnel



b) Salida a la calle Boyacá



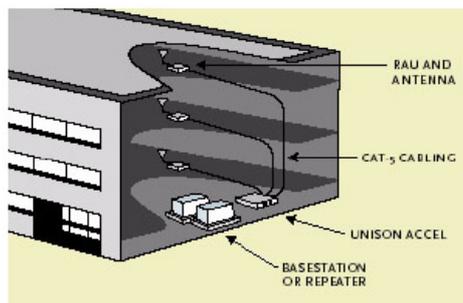
## ANEXO D: Especificaciones técnicas de los elementos del DAS

a) LGC Wireless - Unison Accel 4x4 Cellular

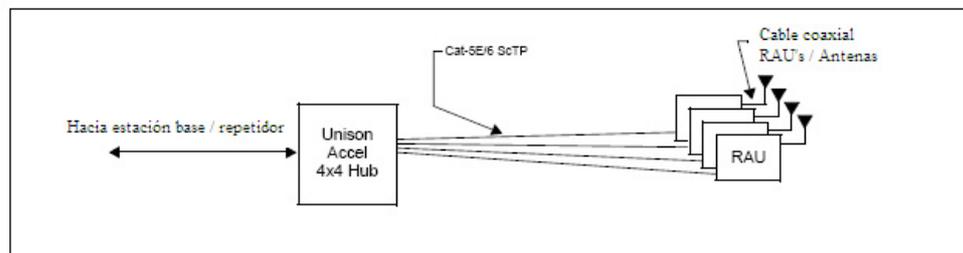
interreach™ unison accel



**Accel 4x4 Cellular  
Equipo DAS**



**Ejemplo de esquema**



**Arquitectura del sistema DAS**

b) Andrew – Repetidor para interiores MR853D (Banda selectiva)



MR803D, MR853D, MR903D,  
MR1703D, MR1903D

## ESPECIFICACIONES

MR803D, MR853D, MR903D, MR1703D, MR1903D

### Especificaciones Eléctricas

Rango de frecuencias, MHz

MR803D	Subida .....	806 to 824
	Bajada .....	851 to 869
MR853D	Subida .....	824 to 849
	Bajada .....	869 to 894
MR903D	Subida .....	896 to 902
	Bajada .....	935 to 941
MR1703D	Subida .....	1710 to 1755
	Bajada .....	2110 to 2155
MR1903D	Subida .....	1850 to 1915
	Bajada .....	1930 to 1995

Frecuencia central, pasos en KHz

MR803D	.....	200
MR853D	.....	200
MR903D	.....	200
MR1703D	.....	200
MR1903D	.....	250

Opciones pasabanda, MHz

MR803D	.....	7.8, 12.5, 15, 18
MR853D	.....	1.5, 5, 10, 12.5, 15, 25
MR903D	.....	6
MR1703D	.....	5, 10
MR1903D	.....	5, 7.8, 10, 15, 20

P-1dB, dBm

Subida .....	+26.5
Bajada .....	+26.5

OICP3, dBm

Subida .....	+34.5
Bajada .....	+34.5

Subida .....	6.5
Bajada .....	6.5

Retardo, microsegundos

..... 4

Ganancia, dB

..... 70

Rango de ajuste de ganancia, dB

..... 20, en pasos de 2

Emisión de espurias, dBm

..... <-13

Voltaje

Voltaje principal, Vac	.....	100 to 240
Voltaje local, Vdc	.....	7.5
Consumo de potencia, vatios	.....	12

Antena

Conector ..... SMA-Femda\*

Pérdida retorno, dB

..... 12

### Potencia de Salida RF (Subida y Bajada)

Tecnología	Potencia de salida por portadora, dBm			
	1	2	4	8
Analóg	18	15	12	9
CDMA	16	13	10	7
EDGE	18	15	12	9
GSM	18	15	12	9
iDEN	16	13	10	7
TDMA	18	15	12	9
W-CDMA	11	8	5	2
TETRA 800	14	11	8	5

### Supervisión y Control del Sistema

Alarmas

.....	Temperatura
.....	Corriente
.....	ALC

Características

.....	Adaptación automática de ganancia
.....	Selección automática de ganancia en función de selección automática
.....	LED's indicadores de alarma
.....	Control automático de ganancia (ALC)



**ANDREW**

One Company. A World of Solutions.

Andrew Corporation  
Worldwide Headquarters  
3 Westbrook Corporate Center  
Suite 900  
Westchester, Illinois 60154 USA

Customer Support Center  
From North America  
Telephone: 1-800-255-1479  
Fax: 1-800-349-5444  
International  
Telephone: +1-708-873-2307  
Fax: +1-708-349-5444  
Internet: www.andrew.com

Andrew Wireless Systems GmbH  
Industriering 10  
86675 Buchdorf  
Germany  
Telephone: +49 9099 69 0  
Fax: +49 9099 69 930

All designs, specifications and availabilities of products and services presented in this bulletin are subject to change without notice.

Bulletin PA-101006.5EN (03/07)

© 2007 Andrew Corporation,  
Westchester, Illinois 60154 USA

**ANEXO E: Fotos de pruebas de campo (Prueba de propagación) en el túnel del cerro El Carmen**





## ANEXO F: Cotizaciones



Quito, 12 de Agosto del 2008

Señor.  
Giovanni Campodónico

**Ref.: Proyecto sistema DAS LGC Wireless**  
CAPACIDAD: 4 RAU, single band

**PROFORMA**  
Nº. CT080313-02

Estimado Sr. Campodónico:

Milestone Technologies se complace en ofertar el proyecto requerido en referencia según el siguiente detalle:

### 1. EQUIPOS LGC WIRELESS

ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCION	PRECIO UNITARIO	PRECIO GLOBAL
1	1	UNISON ACCEL HUB 4 PUERTOS	\$4,758.28	\$4,758.28
2	4	UNISON 800MHZ TDMA/CDMA/GSM REMOTE ACCESS UNIT	\$1,218.96	\$4,875.84
3	2	CAT-5/6,EXTENDER,170M	\$564.72	\$1,129.44
SUBTOTAL				\$10,763.56

### 2. ACCESORIOS Y MATERIALES RF

ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCION	PRECIO UNITARIO	PRECIO GLOBAL
1	1	Cable, Coax MHUB - 20ft N-Male to N-male	\$87.33	\$87.33
2	3	Cable assy, N-male to N-male, 30", RG142	\$43.66	\$130.98
3	1	Circulator, 790-960MHZ	\$291.09	\$291.09
4	4	Indoor Directional Panel Antenna, N, HBW 90	\$124.83	\$499.32
5	4	Jumper, SFF 1.5, N-Male and SMA-Male, length 1 meter	\$32.88	\$131.52
SUBTOTAL				\$1,140.24



### 3. MATERIALES DE INSTALACIÓN

ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCION	PRECIO UNITARIO	PRECIO GLOBAL
1	1	Kit de Instalación Incluye Cable ScTP para conexión Accel Hub - Rau (400 m) Tubería PVC para instalación en ductos Rack abierto para pared, 8 UR Accesorios y materiales menudos de instalación	\$997.99	\$997.99
<b>SUBTOTAL</b>				<b>\$997.99</b>

### 4. SERVICIOS

ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCION	PRECIO UNITARIO	PRECIO GLOBAL
1	1	SERVICIOS Incluye Instalación de equipo, cableado y antenas Configuración y puesta a punto del sistema	\$2,780.00	\$2,780.00
<b>SUBTOTAL</b>				<b>\$2,780.00</b>

TOTAL DEL PROYECTO (SIN IVA): USD **\$15,681.79**



**CONDICIONES:**

**Precios no incluyen IVA**

**Validez de la proforma:** 30 días

**Forma de pago:** 100% a 30 días de entrega de factura.

**INCOTERM:** DDP Quito, en bodegas del cliente.

**Tiempo de entrega:**

Equipo: 30 días (fabricación+importación)  
Instalación: 5 días (una vez obtenido permisos por parte del cliente)

**Garantía:** 12 meses

**No incluye:**

- Adecuaciones de obra civil previas a la instalación
- Obtención de permisos de instalación
- Transporte al sitio de los equipo

Por Milestone Technologies

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Raúl A. Naranjo'.

Ing. Raúl A. Naranjo, M.Sc.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hernando Rábanos José María, **“Comunicaciones móviles GSM”**, Editorial Centro de Estudios Ramón Areces, Segunda Edición 2004.
- [2] Pérez Yuste Antonio, **“El servicio de telefonía móvil en España”**, Foro Histórico de las Telecomunicaciones, 2005.
- [3] Malave Mauriem, **“Sistemas de comunicación inalámbrica”**, Universidad Bicentennial de Aragua, Venezuela, 2000.
- [4] ERICSSON, **“CMS 8800 Introducción”**, Texas, 1998.
- [5] Joskowicz José, **“Breve historia de las telecomunicaciones”**, Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería Universidad de la República, Agosto 2007.
- [6] Telefónica Móviles España, **“Código de buenas prácticas de telefonía móvil”**, 2005.

- [7] Telefónica Móviles España, **“Las telecomunicaciones y la movilidad en la sociedad de la Información”**, Capítulo 1 – Introducción, 2006.
- [8] Mare Renzo, **“Introducción a la telefonía celular”**, Universidad Nacional de Rosario, 2003.
- [9] Rappaport Theodore, **“Wireless communications - Principles & Practice”**, Prentice Hall PTR, 1996.
- [10] Universidad Politécnica de Cartagena – Consejería de Ciencia, Tecnología, Industria y Comercio de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, **“Telefonía móvil y salud”**, Enero 2002.
- [11] Román Martínez Isabel, **“Arquitectura de redes sistemas y servicios”**, Mayo 2004.
- [12] Willassen Svein Yngvar, **“The GSM system”**,  
<http://www.willassen.no/msl/diplom.html>, Marzo 12 de 1998.
- [13] Pachón de la Cruz Álvaro, **“Evolución de los sistemas móviles celulares GSM”**, Octubre 29 del 2004.

- [14] Grote Walter, **“Comunicaciones inalámbricas”**, Departamento de Electrónica de la Universidad Santa María, Valparaíso, Chile, 2002.
- [15] Bernal Iván, **“Comunicaciones Inalámbricas”**, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2006.
- [16] Cisco, **“Overview of GSM, GPRS, and UMTS”**,  
[http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/product/wireless/moblwrls/cm\\_x/mmg\\_sg/cmzgsm.htm](http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/product/wireless/moblwrls/cm_x/mmg_sg/cmzgsm.htm), 2006.
- [17] Telefónica Móviles España, **“Las telecomunicaciones y la movilidad en la sociedad de la información”**, Capítulo 9 - Soluciones para entornos especiales, 2006.
- [18] Ericsson, **“Wireless networks for in-building environments”**, White paper, Abril 2005.
- [19] Telergia Web-Blog Interactivo, **“Repetidores celulares como complemento de radiobases celulares”**,  
[http://www.sertec.com.py/telergia/telergia/informaciones/repetidores\\_celulares.html](http://www.sertec.com.py/telergia/telergia/informaciones/repetidores_celulares.html).

- [20] Rosas Aparicio Luis, **“Procesamiento de la voz en sistemas de comunicación inalámbricos”**, Corpoven S.A.,  
[http://neutron.ing.ucv.ve/revista-e/No2/Luis\\_Rosas.htm](http://neutron.ing.ucv.ve/revista-e/No2/Luis_Rosas.htm).
- [21] Díaz Zegarra José, **“Determinación de coeficientes de atenuación en radiopropagación para modelos outdoor de telefonía celular”**, Universidad Nacional de Ingeniería, Unidad de Post Grado, Lima.
- [22] Córdova Hernán, **“Modelo de propagación en interiores”**, Materia Comunicaciones Inalámbricas – Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (ESPOL), Junio 2004.
- [23] García Fernández Néstor, **“Modelo de cobertura en redes inalámbricas basada en radiosidad por refinamiento progresivo”**, Universidad de Oviedo – Departamento de Informática, Marzo 2006.
- [24] Recomendación UIT-R P.1406, **“Aspectos de la propagación relativos al servicio móvil terrestre terrenal en las bandas de ondas métricas y decimétricas”**, UIT-R, Cuestión UIT-R 203/3, 1999.

- [25] Distributed Antenna Systems, “**Qualcomm student guide – Book 2**”, 2004.
- [26] Infinigy Networks, “**An introduction to neutral host distributed antenna systems (Whitepaper)**”, 99 Pine Street - Albany, NY 12207.
- [27] LGC Wireless, “**Products corporate brochure**”, 2005.
- [28] Alcívar Ernesto, “**Repeater amplifier systems: Principles and applications**”, Seminar subjects of Tx-Rx Systems Inc., 1994.
- [29] Mesen Daniel, “**Antenas**”, Universidad Fermín Toro – Escuela de Ingeniería Eléctrica, Diciembre 2005.
- [30] Telergia Web-Blog Interactivo, “**Cables coaxiales**”, [http://www.sertec.com.py/telergia/telergia/informaciones/cables\\_coaxiales.html](http://www.sertec.com.py/telergia/telergia/informaciones/cables_coaxiales.html).
- [31] Wikipedia, “**Fibra óptica**”, [http://es.wikipedia.org/wiki/Cable\\_de\\_fibra\\_%C3%B3ptica](http://es.wikipedia.org/wiki/Cable_de_fibra_%C3%B3ptica).
- [32] Urueña Edsel Enrique, “**Cableado**”, [www.monografias.com](http://www.monografias.com), 2005.

- [33] Wikipedia, “**Cable par trenzado**”,  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Cable\\_par\\_trenzado](http://es.wikipedia.org/wiki/Cable_par_trenzado).
- [34] ZATOR Systems, “**Tecnología del PC**”,  
[http://www.zator.com/Hardware/H12\\_4\\_2.htm](http://www.zator.com/Hardware/H12_4_2.htm).
- [35] Huemer Eduardo, “**Guía práctica de antenas**”, Kathrein Mobilcom  
Brasil, Octava Edición, Junio del 2002.
- [36] Wikipedia, “**Túnel**”, <http://es.wikipedia.org/wiki/T%C3%BAnel>.
- [37] M.I. Municipalidad de Guayaquil, “**Proyectos CAF I/II – Túneles  
cerro Santa Ana**”, <http://www.guayaquil.gov.ec/48/3311.gye>.
- [38] Diario Hoy Digital, “**Guayaquil un símbolo del país**”,  
<http://www.hoy.com.ec/especial/guayas/guayas1.htm>.