

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE ANTENAS INTELIGENTES PARA EL SISTEMA CELULAR CDMA 3G1X DE MOVILNET**

**Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título  
de Especialista en Telecomunicaciones Digitales  
Por el Ing. De Quintal Rodrigues, Marco Antonio**

**Caracas, Octubre 2004**

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE ANTENAS INTELIGENTES PARA EL SISTEMA CELULAR CDMA 3G1X DE MOVILNET**

**TUTOR ACADÉMICO: Prof. Franklin Martínez**

**Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título  
de Especialista en Telecomunicaciones Digitales  
Por el Ing. De Quintal Rodrigues, Marco Antonio**

**Caracas, Octubre 2004**

**De Quintal Rodrigues, Marco Antonio**

## **FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE ANTENAS INTELIGENTES PARA EL SISTEMA CELULAR CDMA 3G1X DE MOVILNET**

**Tutor Académico: Prof. Franklin Martínez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. 2004, 105 p.**

Palabras Claves: **Antenas Inteligentes, CDMA, Sistemas celulares, Telecomunicaciones.**

**Resumen.** Telecomunicaciones Movilnet posee actualmente una red CDMA 3G1X, que aun no ha alcanzado su tope de capacidad debido a su poco tiempo de funcionamiento, sin embargo las proyecciones indican que un corto plazo la compañía deberá afrontar problemas de capacidad.

Unas de las alternativas que existen en el mercado para atacar el problema de capacidad que enfrentan los proveedores de servicios de telefonía celular, son las antenas inteligentes. Están constituidas por un arreglo de antenas y una parte de control, que monitorea las condiciones de radiofrecuencia, incluyendo el tráfico y los niveles de interferencia, para producir los ajustes en el patrón de radiación del arreglo de antenas que permita hacer un mejor aprovechamiento del recurso radioeléctrico.

La finalidad de este trabajo es la de determinar la factibilidad de implementación de los sistemas de antenas inteligentes, en el sistema de telefonía celular CDMA 3G1X que posee actualmente Telecomunicaciones Movilnet, explorando los beneficios que se podría obtener con este tipo de tecnología, las condiciones que la ameritarían, las ventajas que ofrecen en comparación con otras soluciones, la interacción que podría tener los sistemas de antenas inteligentes con el sistema CDMA y las opciones de antenas inteligentes que existen en el mercado.

A partir del estudio se obtuvo que la opción más sencilla de implementación para la red CDMA de Movilnet, son los sistemas alojados de antenas inteligentes de Lucent Technologies. Del análisis estadístico realizado a un universo de 155 radio bases del sistema CDMA de La Gran Caracas, se determinó que un 21% de ellas serían susceptibles para la implementación de antenas inteligentes, basado en las variaciones en los focos de tráfico que experimentan los sectores de la radio base, a lo largo del día.

A nivel teórico se determinó que los procesos de llamada de acceso, voceo y relevo, se podrían ver afectados de manera negativa con la implementación de antenas inteligentes. Es necesario antes de llevar a cabo cualquier implementación masiva de este tipo de sistema, verificar que los parámetros de calidad asociados a estos procesos, no se vean afectados.

A Dios

A mis padres, Fátima y Antonio

A mis hermanas, Cristina y Adriana

“Todo aumento de  
visión Involucra un esfuerzo”

Franken Van Määrtm

## **AGRADECIMIENTOS**

Al profesor Franklin Martínez, por su sabia orientación y respaldo en todo el período de la tesis.

A las personas que compartieron conmigo este postgrado, mis amigos Antonio, Saymar A., José Eduardo y Víctor. Con ellos, el proceso educativo se hizo más placentero y enriquecedor.

A mis compañeros y amigos de supervisión: Rosana, Carlos e Irene, por el respaldo y apoyo en el desarrollo de esta tesis. De igual manera al resto de mis compañeros de Movilnet.

A mis amigos de siempre, Julián, Olga, Sory, Maurice, Jennifer y Rowdy. Por sus siempre oportunas palabras de aliento, y por su preocupación por alcanzar el feliz termino de este caminar.

A todo el personal académico de la Universidad Central de Venezuela, por sus lecciones impartidas a lo largo del postgrado.

A todos los que de alguna manera aportaron un granito de arena...GRACIAS TOTALES.

# Tabla de Contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. RADIACIÓN Y ANTENAS.....</b>	<b>4</b>
2.1. INTRODUCCIÓN .....	4
2.2. TRANSMISIÓN EN ESPACIO LIBRE.....	4
2.3. REFLEXIÓN EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA.....	5
2.3.1. <i>Modelo de Reflexión sobre tierra plana</i> .....	5
2.4. FENÓMENO DE LA DIFRACCIÓN .....	7
2.4.1. <i>Zonas de Fresnel</i> .....	7
2.4.2. <i>Efectos de los obstáculos</i> .....	8
2.5. OTROS FENÓMENOS PRESENTES EN LA PROPAGACIÓN.....	9
2.5.1. <i>Efecto de los edificios</i> .....	9
2.5.2. <i>Efectos de la vegetación</i> .....	10
2.6. ANTENAS. INTRODUCCIÓN.....	10
2.7. ANTENAS. CONCEPTOS.....	11
2.7.1. <i>Patrón de radiación</i> .....	11
2.7.2. <i>Directividad y Ganancia</i> .....	12
2.7.3. <i>Polarización</i> .....	12
2.7.4. <i>Impedancia</i> .....	13
2.8. TIPOS DE ANTENAS.....	13
2.8.1. <i>Antenas Resonantes empleadas en telefonía celular</i> .....	13
2.9. ALTURA E INCLINACIÓN DE LAS ANTENAS .....	14
2.10. SISTEMAS DE DIVERSIDAD DE ANTENAS.....	15
2.10.1. <i>Diversidad espacial de antenas</i> .....	16
2.10.2. <i>Diversidad de polarización</i> .....	16
2.11. ESTRUCTURAS PARA SOPORTE DE ANTENAS.....	17
2.11.1. <i>Influencia de la estructura soportante en el diagrama de radiación de la antena</i> .....	18
<b>3. SISTEMAS CDMA 3G1X .....</b>	<b>21</b>
3.1. INTRODUCCIÓN A CDMA.....	21
3.2. ENSANCHAMIENTO DEL ESPECTRO DE CDMA.....	21
3.2.1. <i>Ensanchamiento de espectro en secuencia directa</i> .....	21
3.2.2. <i>Códigos empleados en CDMA</i> .....	22
3.2.3. <i>Procesamiento y codificación en el enlace de bajada</i> .....	24
3.2.4. <i>Procesamiento y codificación en el enlace de subida</i> .....	25
3.3. CANALES LÓGICOS DE CDMA.....	27
3.3.1. <i>Enlace de bajada</i> .....	27
3.3.2. <i>Enlace de subida</i> .....	28
3.4. PROCESAMIENTO DE LLAMADA.....	28
3.4.1. <i>Estado de Inicialización</i> .....	29
3.4.2. <i>Estado Ocioso</i> .....	30
3.4.3. <i>Estado de acceso al sistema</i> .....	30
3.4.4. <i>Estado de conversación</i> .....	31
<b>4. ANTENAS INTELIGENTES.....</b>	<b>37</b>
4.1. INTRODUCCIÓN .....	37
4.2. BENEFICIOS POTENCIALES DE LAS ANTENAS INTELIGENTES .....	37
4.2.1. <i>Incremento de la cobertura</i> .....	37
4.2.2. <i>Reducción de la dispersión de retardos y del desvanecimiento</i> .....	37
4.2.3. <i>Patrones de radiación ajustables</i> .....	38
4.2.4. <i>Incremento de la capacidad y de la eficiencia espectral</i> .....	38

4.3. TECNOLOGÍA DE LAS ANTENAS INTELIGENTES.....	38
4.4. CLASIFICACIÓN DE LAS ANTENAS INTELIGENTES.....	41
4.4.1. Según la tecnología.....	41
4.4.2. Según la formación de lóbulos.....	42
4.4.3. Según el ajuste del patrón de radiación.....	43
4.5. CAPACIDAD DE AJUSTE DE LAS ANTENAS INTELIGENTES.....	45
4.6. DIVERSIDAD Y SECTORIZACIÓN CON ANTENAS INTELIGENTES.....	49
4.7. ANTENAS INTELIGENTES EN EL ENLACE DE BAJADA.....	51
4.8. PROVEEDORES ACTUALES DE ANTENAS INTELIGENTES.....	52
4.8.1. Sistemas superpuestos de antenas inteligentes para CDMA.....	53
4.8.2. Sistemas alojados de antenas inteligentes para CDMA.....	54
<b>5. ANTENAS INTELIGENTES Y CDMA.....</b>	<b>57</b>
5.1. INTRODUCCIÓN.....	57
5.2. IMPACTO DE LAS ANTENAS INTELIGENTES EN EL ENLACE DE SUBIDA.....	57
5.2.1. Acceso al sistema.....	57
5.3. IMPACTO DE LAS ANTENAS INTELIGENTES EN EL ENLACE DE BAJADA.....	58
5.3.1. Manejo del canal piloto.....	58
5.4. IMPACTO DE LAS ANTENAS INTELIGENTES AL PROCESO DE RELEVO.....	59
5.4.1. Intensidad de los canales pilotos.....	60
5.4.2. Lista de pilotos vecinos.....	60
5.5. IMPACTO DE LAS ANTENAS INTELIGENTES EN LOS CONTROLES DE POTENCIA.....	63
5.6. TRANSMISIÓN DE DATOS A ALTA VELOCIDAD.....	63
5.7. CONDICIONES DE RF PARA LA TRANSMISIÓN DE DATOS.....	63
5.8. CARACTERÍSTICAS DE UNA LLAMADA DE DATOS.....	65
5.8.1. Algoritmo SARA.....	66
5.8.2. Proceso de relevo durante una llamada de datos.....	67
5.9. TRANSMISIÓN DE DATOS EN ESPACIOS EXTERIORES E INTERIORES.....	67
5.9.1. Cobertura en exteriores.....	67
5.9.2. Cobertura en interiores.....	71
<b>6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS RADIO BASES.....</b>	<b>75</b>
6.1. INTRODUCCIÓN.....	75
6.2. FINALIDAD DEL ESTUDIO.....	76
6.3. ESTUDIO DE VARIACIÓN DE TRÁFICO ENTRE SECTORES.....	76
6.3.1. Consideraciones.....	76
6.3.2. Selección de las muestras.....	77
6.3.3. Cálculos estadísticos realizados.....	77
6.4. RESULTADOS PARA EL SISTEMA TDMA.....	82
6.4.1. Casos de estudio.....	83
6.5. RESULTADOS PARA EL SISTEMA CDMA.....	86
6.5.1. Casos de estudio.....	87
<b>7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>93</b>
<b>8. REFERENCIAS.....</b>	<b>95</b>
<b>9. ANEXOS.....</b>	<b>97</b>
9.1. ESTUDIO ESTADÍSTICO DE CDMA.....	97
9.2. ESTUDIO ESTADÍSTICO DE TDMA.....	100

## Lista de Figuras

FIGURA 2.1. DIAGRAMA DE REFLEXIÓN SOBRE TIERRA PLANA. ....	6
FIGURA 2.2. ELIPSOIDE DE FRESNEL.....	8
FIGURA 2.3. CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS PARA EL ANÁLISIS TIPO “FILO DE CUCHILLO”, UTILIZADAS PARA EL CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS POR DIFRACCIÓN. ....	9
FIGURA 2.4. PATRÓN DE RADIACIÓN DE UNA ANTENA DE APERTURA HORIZONTAL DE 90° Y APERTURA VERTICAL DE 14,6°. ....	12
FIGURA 2.5. VARIACIÓN DEL PATRÓN HORIZONTAL, CON DIVERSAS INCLINACIONES MECÁNICAS. ....	15
FIGURA 2.6. IMPLEMENTACIÓN TÍPICA DE UN SISTEMA CON DIVERSIDAD ESPACIAL, VERTICAL Y HORIZONTAL	16
FIGURA 2.7. TIPOS DE ESTRUCTURAR PARA SOPORTAR LAS ANTENAS. ....	18
FIGURA 2.8. INTERACCIÓN DE LOS MÁSTILES CON LAS ANTENAS. ....	19
FIGURA 2.9. PATRONES DE RADIACIÓN OBTENIDOS EN MONTAJES DE PAREDES .....	20
FIGURA 3.1. PROCESO PARA LA GENERACIÓN DE CÓDIGOS WALSH.....	23
FIGURA 3.2. PROCESAMIENTO EN EL CANAL DE TRÁFICO DESCENDENTE.....	24
FIGURA 3.3. PROCESAMIENTO EN EL CANAL DE TRÁFICO ASCENDENTE .....	26
FIGURA 3.4. DIAGRAMA DE ESTADOS DEL PROCESAMIENTO DE LLAMADAS EN LOS SISTEMAS CDMA.....	29
FIGURA 3.5. MECANISMO DE UN INTENTO DE ACCESO.....	30
FIGURA 3.6 TRANSICIONES ENTRE LAS LISTAS DE PILOTOS EN EL PROCESO DE RELEVO .....	33
FIGURA 3.7 CONTROL DE POTENCIA PARA ENLACE DE SUBIDA EN LOS SISTEMAS 3G1X .....	35
FIGURA 4.1. GEOMETRÍA EMPLEA EN EL ESTUDIO DE LOS ARREGLOS DE ANTENAS. ....	39
FIGURA 4.2. GEOMETRÍA DE UN ARREGLO DE ANTENAS DISPUESTO DE MANERA LINEAL. ....	40
FIGURA 4.3. SISTEMA DE ARREGLO LINEAL CON LA RED DE PONDERADORES .....	40
FIGURA 4.4. ESQUEMA ELEMENTO-ESPACIO .....	43
FIGURA 4.5. ESTRUCTURA DE UN ARREGLO ADOPTIVO.....	44
FIGURA 4.6. GEOMETRÍA DEL ESTUDIO DE DESEMPEÑO DE UN ARREGLO DE 3 ELEMENTOS, CON UNA SEÑAL FUENTE Y 4 INTERFERENTES. ....	45
FIGURA 4.7. PATRONES OBTENIDOS CON EL ARREGLO DE 3 ELEMENTOS, PARA UNA FUENTE Y UN INTERFERENTE .....	46
FIGURA 4.8. PATRONES OBTENIDOS CON EL ARREGLO DE 3 ELEMENTOS, PARA UNA FUENTE Y DOS INTERFERENTES. ....	47
FIGURA 4.9. PATRONES OBTENIDOS CON EL ARREGLO DE 3 ELEMENTOS, PARA UNA FUENTE Y TRES INTERFERENTES. ....	48
FIGURA 4.10. PATRONES OBTENIDOS CON EL ARREGLO DE 3 ELEMENTOS, PARA UNA FUENTE Y CUATRO INTERFERENTES. ....	48
FIGURA 4.11. ESQUEMA QUE EMPLEA DIVERSIDAD DE REDES ADAPTIVAS.....	50
FIGURA 4.12. VISTA SUPERIOR DE UNA IMPLEMENTACIÓN CON DIVERSIDAD, SECTORIZACIÓN Y ANTENAS INTELIGENTES.....	51
<b>FIGURA 5.1.</b> ESQUEMA QUE EMPLEA POR SEPARADO LOS CANALES DE TRÁFICO, DE LOS CANALES PILOTOS, DE SINCRONÍA Y DE VOCEO. ....	59
<b>FIGURA 5.2.</b> INTERACCIÓN DE VARIAS RADIO BASES EN EL PROCESO DE RELEVO. ....	61
<b>FIGURA 5.3.</b> INTERACCIÓN DE RADIO BASES CON ANTENAS INTELIGENTES, EN EL PROCESO DE RELEVO. ....	62
FIGURA 5.4. TASAS DE TRANSMISIÓN, SEGÚN LA SEPARACIÓN ENTRE EL MÓVIL Y LA RADIO BASE. ....	65
FIGURA 5.5. PROCESO DE UNA LLAMADA DE DATOS.....	66
FIGURA 5.6. ESTACIÓN BASE CON RADIO DE COBERTURA D, ALTURA H, E INCLINACIÓN DE A .....	69
FIGURA 5.7. REDUCCIÓN DEL RADIO DE COBERTURA DE LA ESTACIÓN BASE.....	69
FIGURA 5.8. ESQUEMA DONDE SE INCREMENTA LA DENSIDAD DE RADIO BASES.....	70
FIGURA 5.9. IMPLEMENTACIÓN PARA SOLUCIONAR PROBLEMAS DE COBERTURA DE INTERIORES.....	73
FIGURA 5.10. IMPLEMENTACIÓN CON SISTEMA DE ANTENAS DISTRIBUIDAS, PARA ESPACIOS INTERIORES.....	74
FIGURA 6.1. TENDENCIA DE TRÁFICO DE LA RBS TDMA DE PLAZA VENEZUELA. ....	79
FIGURA 6.2 TENDENCIA DE TRÁFICO DE LA RBS TDMA DE CHUAO. ....	80
FIGURA 6.3 TENDENCIA DE TRÁFICO DE LA RBS TDMA DE LA CALIFORNIA. ....	82
FIGURA 6.4. TENDENCIA DE TRÁFICO DE LA RADIO BASE TDMA DE LA URBINA.....	84
FIGURA 6.5 TENDENCIA DE TRÁFICO DE LA ESTACIÓN TDMA DE GUAICOCO.....	86
FIGURA 6.6 TENDENCIA DE TRÁFICO DE LA ESTACIÓN CDMA EL CEMENTERIO.....	88

FIGURA 6.7 TENDENCIA DE TRÁFICO DE LA ESTACIÓN CDMA LA URDANETA. ....	90
FIGURA 6.8 TENDENCIA DE TRÁFICO DE LA ESTACIÓN CDMA LOS CORTIJOS. ....	91
FIGURA 6.9 TENDENCIA DE TRÁFICO DE LA ESTACIÓN CDMA DE PLAZA ALTAMIRA .....	92

## Lista de Tablas

TABLA 4.1. PRODUCTOS DE SISTEMAS SUPERPUESTOS DE ANTENAS INTELIGENTES.....	53
TABLA 6.1. EJEMPLO DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO EMPLEADO EN EL ESTUDIO, PARA LA RADIO BASE TDMA DE PLAZA VENEZUELA. ....	78
TABLA 6.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA RADIO BASE TDMA DE CHUAO.....	80
TABLA 6.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA RADIO BASE TDMA DE LA CALIFORNIA. ....	81
TABLA 6.4 UNIVERSO DE MUESTRAS EMPLEADO EN EL ESTUDIO PARA EL SISTEMA TDMA.....	83
TABLA 6.5 ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS DESVIACIONES ESTÁNDARES DE LOS SECTORES. ....	83
TABLA 6.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA RBS LA URBINA TDMA.....	84
TABLA 6.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA RBS GUAICOCO TDMA.....	85
TABLA 6.8 UNIVERSO DE MUESTRAS EMPLEADO EN EL ESTUDIO PARA EL SISTEMA CDMA.....	86
TABLA 6.9 ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS DESVIACIONES ESTÁNDARES DE LOS SECTORES. ....	87
TABLA 6.10 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA RBS EL CEMENTERIO CDMA.....	88
TABLA 6.11 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA RBS CDMA LA UR DANETA.....	89
TABLA 6.12 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA RBS CDMA LOS CORTIJOS .....	90
TABLA 6.13 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA RBS CDMA PLAZA ALTAMIRA .....	92

# 1. INTRODUCCIÓN

Movilnet es una empresa de telecomunicaciones fundada en 1992 como filial de CANTV para ofrecer servicios de telefonía celular en Venezuela. Su misión es “Mejorar la calidad de vida de la gente en Venezuela al proveer soluciones de comunicaciones que exceden las expectativas de nuestros clientes” y su visión es “Ser el proveedor preferido de servicios integrales de telecomunicaciones de Venezuela, y satisfacer plenamente las necesidades específicas de nuestros clientes, siempre bajo exigentes patrones de ética y rentabilidad”.

La demanda del servicio móvil celular, en un poco más de una década de existencia ha sido enorme. Entre los años 1998 y 2000, se produjeron las más altas tasas de crecimiento de suscriptores, superando el 50%. En parte, el servicio tuvo un gran auge, gracias a la aparición de la modalidad prepagada. En la actualidad la base de clientes de Movilnet es de 2.700.000 usuarios.

En términos tecnológicos, Movilnet ha implementado 3 plataformas. La primera de ellas, la red analógica. Dado a las fuertes limitaciones que presentaba este sistema en cuanto a capacidad y a servicios, rápidamente se pasó al sistema TDMA de tecnología digital. Este sistema abrió las puertas a nuevos servicios como buzones de mensajes, mensajes de textos cortos e identificadores de llamadas. Por último, en el año 2002, se implementa la red CDMA 3G1X, con equipos de Lucent Technologies, como respuesta a la necesidad de migrar hacia una plataforma que permitiera la evolución a sistemas de tercera generación, y con ello, la transmisión de datos inalámbricos a altas velocidades. Con el transcurso del tiempo, los recursos de espectro radioeléctrico destinados a las redes analógicas y digitales serán traspasados hacia la red CDMA, para así lograr explotar al máximo, los servicios y potenciales de esta tecnología.

CDMA, o acceso múltiple por división de código, es una tecnología inalámbrica de reciente implementación, que permite a muchos usuarios compartir el mismo ancho de banda de manera simultánea, mediante el empleo de códigos únicos para cada usuario. Este tipo de tecnología emplea de manera eficiente el limitado recurso espectral, además que provee una comunicación robusta. La variación tecnológica CDMA 3G1X, se fundamenta de igual manera en la división por códigos, pero incluye algunas mejoras que dan paso a la transmisión inalámbrica de datos, permitiendo alcanzar tasas de hasta 153kbps.

Si bien se logra una mejora en la eficiencia espectral al realizar la migración tecnológica de TDMA a CDMA, el rápido crecimiento de la demanda de servicio celular, requiere aun más un empleo racional del recurso del espectro. La transmisión de datos a altas velocidades es un aspecto que también impacta negativamente en el consumo de recursos disponibles. Los sistemas de antenas inteligentes, surgen como alternativa para mejorar las deficiencias en el empleo de espectro, y para obtener una mayor rentabilidad de los recursos disponibles.

Un sistema de antenas inteligentes está constituido por un arreglo de antenas y una parte de control, que monitorea las condiciones de radiofrecuencia, incluyendo el tráfico y

los niveles de interferencia, para ajustar sus variables de operación de tal manera de optimizar el desempeño de la red. La inteligencia del sistema reside en la parte de control, ente que se encarga de producir los ajustes en el patrón de radiación del arreglo de antenas, para así mejorar las relaciones de señal a interferencia.

Los proveedores de sistemas de antenas inteligentes ofrecen sus equipos como alternativas para solucionar problemas de cobertura y capacidad en las redes de telefonía celular. En particular en los sistemas CDMA, los cuales están limitados por la interferencia, al obtener mejoras en las relaciones de señal a ruido, se logra ampliar la capacidad del sistema.

La finalidad de este trabajo es la de determinar la factibilidad de implementación de los sistemas de antenas inteligentes, en el sistema de telefonía celular CDMA 3G1X que posee actualmente Telecomunicaciones Movilnet, explorando los beneficios que se podría obtener con este tipo de tecnología, las condiciones que la ameritarían, las ventajas que ofrecen en comparación con otras soluciones y la interacción que podría tener los sistemas de antenas inteligentes con el sistema CDMA.

Como marco para el logro de los objetivos planteados en este trabajo de investigación, se inicia el desarrollo del tema mediante un repaso de los conceptos de radiación electromagnética y de los sistemas radiantes empleados en las redes inalámbricas de Movilnet. En cuanto al primer aspecto se hizo especial hincapié en los fenómenos que afecta en mayor medida la propagación en los sistemas celulares, y con respecto a lo segundo, se analiza los conceptos de antenas y las diversas implementaciones posibles en telefonía celular. Ambos aspectos son abarcados en el capítulo 2.

En el capítulo 3 se realiza una revisión de la tecnología CDMA 3G1X, considerando los aspectos de la interfaz de aire y de los diversos procesos que llevan a cabo en una llamada. Esta revisión es la que soportará el análisis que se realizará en capítulos posteriores, acerca de la interacción entre los sistemas CDMA y las antenas inteligentes.

La descripción de los sistemas de antenas inteligentes se desarrolla en el capítulo 4, donde se incluye ventajas de los sistemas, breve descripción de su funcionamiento, tipos de sistemas de antenas inteligentes y las diversas implementaciones que se pueden realizar. Este capítulo se cierra con los sistemas de antenas inteligentes que se encuentran actualmente en el mercado, y se analiza la alterativa más viable para Movilnet.

Basados en la información presentada en los capítulos 3 y 4, se realiza un análisis del comportamiento que tendría la red CDMA con la inclusión de antenas inteligentes, principalmente en los procesos de llamada. Después se analiza los procesos para llamadas de datos tanto en ambientes exteriores como en interiores, y se compara las soluciones que se emplean actualmente para dar cobertura, con respecto a antenas inteligentes. Todo este estudio es presentado en el capítulo 5.

En el capítulo 6 se presenta una análisis estadístico que tiene por finalidad determinar que porcentaje de radio bases requieren la implementación de antenas

inteligentes, basados en la variación en los focos de tráfico que pueden experimentar las estaciones a lo largo del día. El estudio se realizó en una muestra de 155 estaciones pertenecientes al mercado de la Gran Caracas. Por último, en el capítulo 7 se expone las conclusiones y las recomendaciones que se desprenden de este trabajo.

## 2. RADIACIÓN Y ANTENAS

### 2.1. Introducción

Los fenómenos involucrados en la propagación de las ondas radioeléctricas son muy diversos, pero en líneas generales pueden ser atribuidos a la reflexión, difracción y dispersión. Buena parte de los sistemas celulares operan en áreas urbanas donde usualmente no existe línea de vista directa entre el transmisor y el receptor, y donde además la presencia de elevadas construcciones produce apreciables pérdidas por difracción. También, debido a las múltiples reflexiones por varios objetos, las ondas electromagnéticas viajan por varios caminos de diversas longitudes. La interacción de estas ondas causan los desvanecimientos por multi-trayecto. Cada uno de los aspectos señalados serán analizados en el contexto de los sistemas de telefonía celular, para después enmarcar la contribución que pueda tener las antenas inteligentes, en el proceso de propagación radio eléctrica.

Se analizará de igual manera la antena, elemento que permite la conversión de las ondas magnéticas guiadas en ondas que viajan en el espacio libre. Se considerarán las variables que describen a las antenas, y otros aspectos de importancia como la diversidad.

### 2.2. Transmisión en espacio libre.

Considere un sistema de comunicación inalámbrico, constituido por un transmisor conectado a una antena de ganancia  $G_t$ , y un receptor con una antena de ganancia  $G_r$ , ambos separados por una distancia  $d$ . Asumiendo que ambas antenas se encuentran perfectamente alineadas, entonces la potencia que se captará en la antena del equipo receptor será:

$$P_r = \frac{\lambda^2 G_t G_r P_t}{(4\pi d)^2} \quad (2.1)$$

La expresión (2.1) se conoce como la ecuación de Frii para la propagación en espacio libre. En ocasiones, dicha expresión es más fácil de utilizar mediante el empleo de unidades de decibeles (ecuación 2.2).

$$P_{r,dBm} = P_{t,dBm} + G_{t,dBi} + G_{r,dBi} - 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi f}{c} \right) - 20 \log_{10}(d) \quad (2.2)$$

La ecuación (2.2) tiene varias implicaciones en los sistemas de comunicación inalámbrica. Para lograr un adecuado desempeño del enlace radioeléctrico, debe existir un mínimo nivel de potencia,  $P_r$ , en el receptor. Dada una separación entre el transmisor y el receptor  $d$ , y una frecuencia de operación  $f$ , existen tres maneras de incrementar  $P_r$ . Una de ellas es aumentar la potencia de transmisión  $P_t$ , sin embargo, si se considera el caso en que el transmisor es una unidad portátil, un incremento en la potencia de transmisión

representaría una disminución en el tiempo de vida de la batería, además del aumento de los costos de los equipos. Alternativamente, se puede incrementar la ganancia de de la antena de transmisión o de recepción.

Del lado del suscriptor, la ganancia de la antena está limitada por varios factores. Debido a que la orientación del usuario varía constantemente con respecto a la estación base, las antenas de los equipos portátiles deben ser capaces de proveer un desempeño uniforme, independientemente de la disposición de la antena. Es por esta razón que se emplean antenas no directivas con muy baja ganancia. Además, el tamaño de los equipos limita la capacidad de elaborar antenas de mayor ganancia, ya que este aspecto esta fuertemente relacionado con el tamaño físico de la antena.

En cuanto a la estación base, se emplea comúnmente antenas con ganancias que van desde 11 a 14 dB de ganancia, esto para lograr una irradiación de energía adecuada para el área de cobertura deseada. Los sistemas de antenas inteligentes, permitirían mejorar este aspecto, al flexibilizar los patrones de radiación posible.

### **2.3. Reflexión en la superficie de la tierra.**

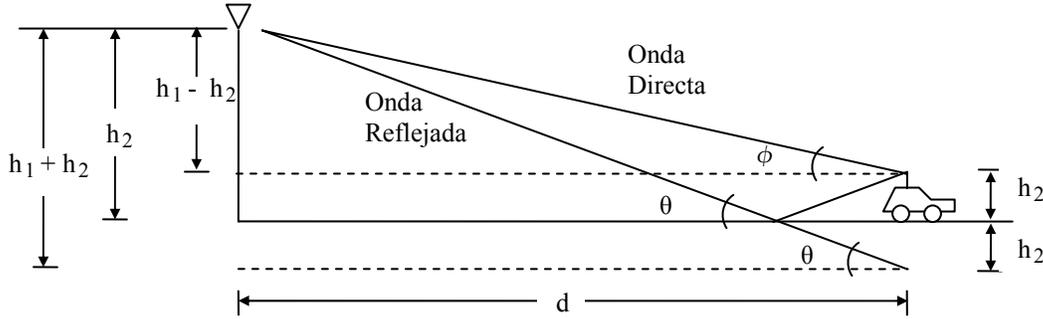
Para la banda de frecuencia celular (800 MHz), las señales que son captadas por la antena de recepción y que son producto de reflexiones en la superficie de la tierra, pueden interferir constructiva o destructivamente a la señal que viaja por el camino directo, dependiendo de la fase relativa de las diversas ondas. La fase relativa y la amplitud de las ondas reflejadas van a depender de la diferencia de longitud de camino, y del coeficiente de reflexión de la superficie.

Cuando la superficie es suave, en otras palabras, no posee rugosidad, se presentan reflexiones especulares y el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. En general, en los sistemas móviles celulares, las ondas incidentes llegan razantes, de tal manera que el coeficiente de reflexión es aproximadamente la unidad, por lo que la atenuación es prácticamente nula y la fase igual a  $180^\circ$ . En cambio, cuando la rugosidad de la superficie es comparable a una longitud de onda, la señal reflejada posee un componente especular que es coherente con la onda incidente, y que genera un componente difuso con una amplitud caracterizada por una distribución Rayleigh. De igual manera, la señal reflejada puede ser bloqueada de manera parcial o total por el terreno o las estructuras a lo largo del camino.

#### **2.3.1. Modelo de Reflexión sobre tierra plana.**

Para la mayoría de los casos estudiados en los sistemas de telefonía celular, no es necesario tomar en cuenta los ajustes por la forma esférica de la tierra, debido a las relativamente cortas distancias en los trayectos de propagación ( $<10$  Km). Estos casos se conocen como propagación con línea de vista, y se considera la superficie de la tierra plana. Bajo estas condiciones, la propagación radioeléctrica puede ser descrita por un modelo

sencillo de 2 rayos, donde el primero recorre el camino directo del trasmisor al receptor, y el segundo sufre una reflexión en la superficie de la tierra (Ver Figura 2.1).



**Figura 2.1.** Diagrama de reflexión sobre tierra plana.

La potencia recibida es igual a:

$$P_r = P_o \left( \frac{1}{4\pi d / \lambda} \right)^2 \left| 1 + a_v e^{j\Delta\phi} \right|^2 \quad (2.3)$$

Donde  $a_v$  es el coeficiente de reflexión de la superficie,  $\Delta\phi$  es la diferencia de fase entre el camino directo y el camino reflejado,  $P_o$  es la potencia transmitida,  $d$  es la distancia entre el transmisor y el receptor y  $\lambda$  es la longitud de onda.

La ecuación (2.3) representa un modelo de dos rayos que describe el fenómeno de pérdidas de camino en un entorno radioeléctrico móvil, pero no está relacionado con los análisis de desvanecimiento por multitrayecto. Para el caso de un ambiente móvil,  $a_v = -1$ , debido a lo pequeño del ángulo de incidencia, se obtiene la expresión 2.4

$$P_r = P_o \left( \frac{1}{4\pi d / \lambda} \right)^2 \left| 1 - \text{Cos}\Delta\phi - j\text{Sen}\Delta\phi \right|^2$$

$$P_r = P_o \frac{2}{(4\pi d / \lambda)^2} (1 - \text{Cos}\Delta\phi) = P_o \frac{4}{(4\pi d / \lambda)^2} \text{Sen}^2 \frac{\Delta\phi}{2} \quad (2.4)$$

La diferencia de fase se expresa como:  $\Delta\phi = \beta\Delta d$ .

$$\Delta\phi = \beta\Delta d = \beta \left[ \left( \sqrt{(h_1 + h_2)^2 + d^2} \right) - \left( \sqrt{(h_1 - h_2)^2 + d^2} \right) \right]$$

$$\Delta\phi \approx \beta \left[ d \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{h_1 + h_2}{d} \right)^2 \right) - d \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{h_1 - h_2}{d} \right)^2 \right) \right] = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{2h_1 h_2}{d} \quad (2.5)$$

Sustituyendo la ecuación (2.5) en la ecuación (2.4)

$$P_r = P_o \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} \text{Sen}^2 \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda d} \quad (2.6)$$

Cuando el valor del argumento *Seno* es pequeño, se puede aproximar al valor del argumento, en definitiva se obtiene:

$$P_r = P_o \left( \frac{h_1 h_2}{d^2} \right)^2 \quad (2.7)$$

La ecuación (2.7) expresada en términos de dB y en términos de pérdidas se convierte en:

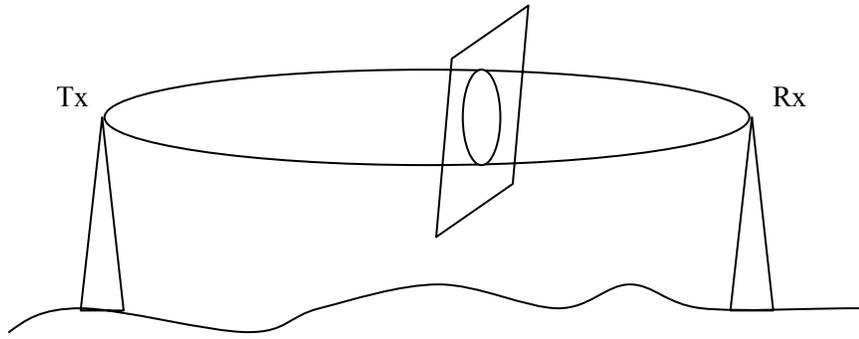
$$L = 40 \log d - 20 \log h_1 h_2 \quad (2.8)$$

La expresión (2.8) indica que para el modelo de dos rayos, con ángulos de incidencias pequeños, las pérdidas de camino crecen a una razón de 40 dB por década, a diferencia de la propagación de espacio libre, que es a 20 dB por década. Adicionalmente, las pérdidas se pueden disminuir al incrementar las alturas de las antenas de transmisión y de recepción.

## 2.4. Fenómeno de la Difracción

### 2.4.1. Zonas de Fresnel.

Existe una serie de puntos del espacio ubicados entre el trasmisor y el receptor, que tienen en común que la diferencia entre la longitud del camino directo de la onda, y la longitud de la onda reflejada,  $\delta$ , es la misma. Todos estos puntos forman una elipsoide de revolución cuyos extremos son el punto trasmisor y el punto receptor, y el eje es el camino directo entre ambos (Figura 2.2). Cuando la diferencia de camino  $\delta$ , cumple la relación,  $n\lambda < \delta < n\lambda/2$ , con  $n=0,2,4\dots$ etc, se producirá una interferencia positiva. En cambio cuando la diferencia es  $n\lambda/2 < \delta < n\lambda$ , con  $n=1,3,5\dots$ etc, la interferencia será destructiva. El elipsoide que tiene la mayor contribución, es el más interior, es decir el que cumple la relación,  $0 < \delta < \lambda/2$ . A este se le conoce como la primera zona de Fresnel.



**Figura 2.2.** Elipsoide de Fresnel

### 2.4.2. Efectos de los obstáculos

Cuando en el terreno entre el transmisor y el receptor existen irregularidades de gran escala como montañas, árboles o edificaciones, se producirán pérdidas adicionales causadas por la obstrucción de la línea de vista en el camino del transmisor al receptor. La magnitud de las pérdidas dependerá de la forma de las irregularidades del terreno, de las características eléctricas del mismo, de la frecuencia de operación, y del porcentaje de obstrucción de las zonas de Fresnel. Para evitar las pérdidas de difracción, se deben colocar las antenas de transmisión y recepción a una altura tal que la primera zona de Fresnel esté libre de obstáculos. Bajo esta condición, se considera que la propagación es similar a la de espacio libre.

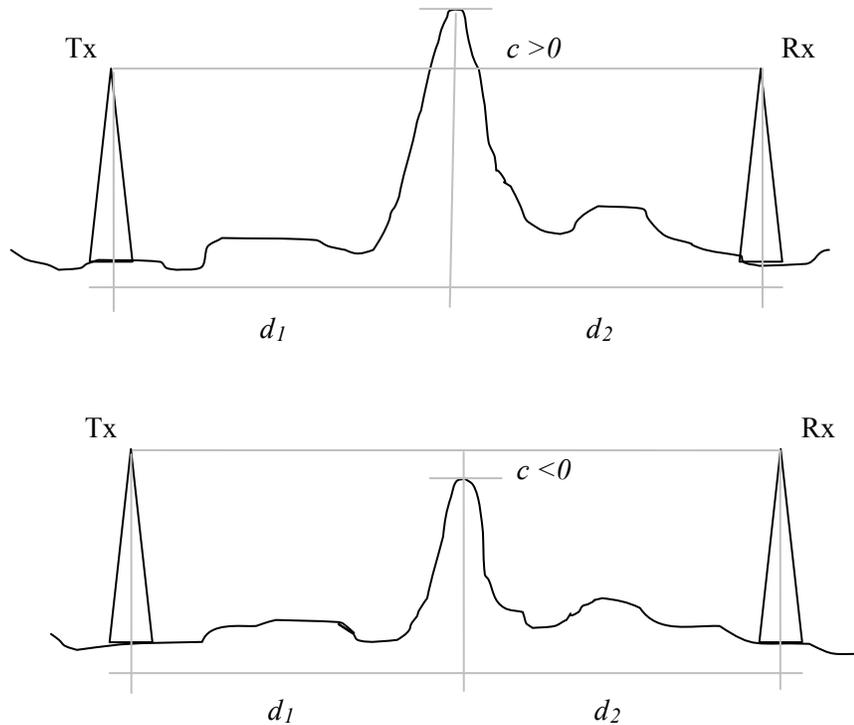
Debido a la dificultad que representa estudiar la influencia de obstáculos de contornos arbitrarios, se generaliza el análisis a objetos tipo “filo de cuchillo”. Estos obstáculos son agudos en el sentido longitudinal del enlace, pero son relativamente anchos en su forma trasversal, para afectar de manera efectiva a las zonas de Fresnel.

En la Figura 2.3 se muestra las consideraciones geométricas a tomar en cuenta. La variable  $c$ , se denomina despeje, y mide la separación entre el obstáculo y el camino directo del transmisor al receptor. La variable será negativa si la línea directa no está obstruida, y positiva si existe la obstrucción. Se define un parámetro adicional  $v$ , que tiene el mismo signo del despeje, y que viene dado por la expresión (2.9)

$$v = c[m] \sqrt{\left(\frac{2}{\lambda[m]}\right) \left(\frac{1}{d_1[m]} + \frac{1}{d_2[m]}\right)} \quad (2.9)$$

Con el resultado anterior se obtiene las pérdidas por difracción, mediante la expresión (2.10). La expresión es válida para valores de  $v > -1$ .

$$L_d(v) = 6,9 + 20 \log\left(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1\right) \quad (2.10)$$



**Figura 2.3.** Consideraciones geométricas para el análisis tipo “filo de cuchillo”, utilizadas para el cálculo de las pérdidas por difracción.

La expresión 2.10 constituye una aproximación al problema de las pérdidas debido a difracción. El valor real se obtiene a partir de las integrales de Fresnel para el cálculo de los campos electromagnéticos en presencia de obstrucciones. Para el caso de difracción por múltiples obstáculos, el cálculo de “filo de cuchillo” es calculado para cada caso, y después se totalizan todas las pérdidas en dB.

## 2.5. Otros fenómenos presentes en la propagación.

### 2.5.1. Efecto de los edificios.

La propagación en áreas urbanas generalmente está dominada por las pérdidas por difracción y reflexión, causadas por los edificios que rodean a los teléfonos móviles. Las señales captadas por estos llegan de todas direcciones y con variaciones aleatorias en la amplitud, la fase y en el retardo de la llegada. Este fenómeno hace imposible el empleo de modelos determinísticos en el cálculo de las predicciones de la recepción de llamadas, por lo que es necesaria la utilización de distribuciones estadísticas.

En algunas situaciones particulares, la reflexión de las ondas en la superficie de un edificio, se puede constituir como un fenómeno predominante en la propagación radioeléctrica, y está determinado por los elementos característicos del edificio, como altura, ancho, orientación, etc. La reflexión en un edificio puede contribuir a que se

perciban fuertes niveles de señal en áreas obstruidas por edificio o por el terreno. En ocasiones la ganancia de reflexión puede ser tal, que se capten señales de recepción superiores a las que se esperarían en espacio libre.

## 2.5.2. Efectos de la vegetación.

En las bandas de operación de la telefonía celular, la vegetación puede introducir importantes pérdidas en la propagación de la señal debido a los fenómenos de dispersión, absorción y obstrucción. Según investigaciones llevadas a cabo por el científico Weissberger, las pérdidas de la propagación producto de la vegetación pueden ser modeladas por un decaimiento exponencial, para los casos en que el rayo de la señal es bloqueado por árboles secos con hojas, y para climas templados. Las ecuaciones (2.11) describen el fenómeno.

$$\begin{aligned} L_r &= 1.33 f^{0.284} d_p^{0.588} \quad \text{para } 14 \leq d_p \leq 400 \\ L_r &= 0.45 f^{0.284} d_p \quad \text{para } 0 \leq d_p \leq 14 \end{aligned} \tag{2.11}$$

$f$  es la frecuencia de operación expresada en GHz, y  $d_p$  es la altura de los árboles, expresado en m. Las pruebas experimentales han arrojado que las pérdidas de propagación debido a los árboles con y sin hojas, varía entre 3 a 5 dB.

## 2.6. Antenas. Introducción.

La misión que cumple una antena dentro de un sistema de telecomunicaciones, es la de convertir la ondas electromagnéticas guiadas en líneas de transmisión o cables coaxiales, en ondas electromagnéticas que viajan en el espacio libre. La definición oficial de antena según la IEEE es: "La parte de un sistema de transmisión o recepción diseñada para radiar o recibir ondas electromagnéticas.

Existen una serie de parámetros propios de las antenas que actúan determinantemente en el desempeño de los sistemas de comunicaciones. Por ejemplo, el patrón de radiación de la antena impacta de manera importante en la capacidad del sistema. Las celdas sectorizadas emplean antenas directivas que dan servicio tan solo en una dirección particular de la celda, reduciendo de esta manera la interferencia co-canal e incrementado la capacidad.

La diversidad de antenas es otro aspecto importante a considerar en los sistemas de telefonía móvil. Los múltiples caminos de propagación ocasionados por los procesos de reflexión, difracción y dispersión, producen desvanecimientos que alteran de manera rápida los niveles de recepción de la señal. Existen diversas técnicas de diversidad que combaten el problema de desvanecimiento y provee mejoras significativas en la calidad del enlace.

Los aspectos mencionados en los párrafos anteriores y muchos otros más, serán considerados en las siguientes secciones, para lograr un buen entendimiento del funcionamiento de los sistemas radiantes, para después dar paso al estudio de las antenas inteligentes, punto central de este trabajo.

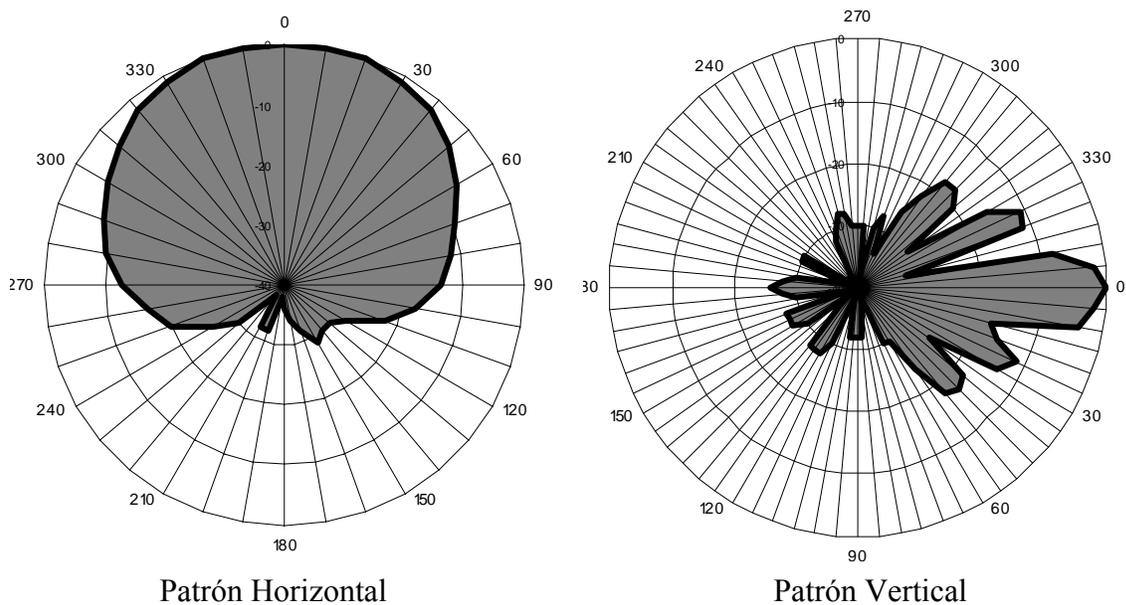
## **2.7. Antenas. Conceptos.**

### **2.7.1. Patrón de radiación.**

Se entiende por patrón de radiación, a la variación angular de la intensidad de campo electromagnético a una distancia fija de la antena, cuando esta se encuentra transmitiendo. La radiación se cuantifica a través de la densidad de potencia  $S$  [ $W/m^2$ ]. El patrón de radiación de una antena contiene un lóbulo principal y lóbulos laterales. El lóbulo principal es aquel que tiene la máxima dirección de radiación. Los lóbulos laterales son todos los demás diferentes al principal.

Típicamente los sistemas radiantes son estudiados en espacios de tres dimensiones, por lo que es necesario presentar el patrón de radiación en al menos 2 planos, para así tener una representación completa del mismo. Se entiende por plano azimutal, al que se encuentra paralelo al horizonte, es decir en un eje coordenado  $XYZ$ , correspondería al plano  $XY$ . El plano de elevación es el que se encuentra perpendicular al plano azimutal. Los fabricantes de antenas usualmente presentan los patrones de radiación en los planos azimutales y de elevación. En la Figura 2.4, se presenta un patrón de radiación para un tipo de antena empleada en los sistemas de telefonía celular.

Los sistemas de comunicaciones inalámbricos emplean dos tipos de patrones: el omnidireccional, que en esencia transmite por igual en todas las direcciones en el plano azimutal y direccionalmente en el plano de elevación; y el direccional, que como su nombre lo indica, transmite de manera directiva en el plano azimutal y de elevación.



**Figura 2.4.** Patrón de radiación de una antena de apertura horizontal de  $90^\circ$  y apertura vertical de  $14,6^\circ$ .

### 2.7.2. Directividad y Ganancia.

Son dos conceptos afines. La directividad es la relación entre la máxima intensidad de radiación de una antena en una dirección dada y el promedio de intensidad de radiación en todas las direcciones. La ganancia en cambio es la relación de la intensidad de radiación con respecto a una radiación isotrópica. La ganancia de la antena y la directividad están relacionadas a través de la eficiencia de la antena  $\eta$ , como se muestra en la ecuación (2.12).

$$G(\theta, \phi) = \eta D(\theta, \phi) \quad (2.12)$$

La eficiencia de la antena toma en consideración las pérdidas en los puertos y en la estructura de la misma. La ganancia se calcula con respecto al patrón de radiación ideal isotrópico, por lo que se expresa en dBi. Los sistemas móviles inalámbricos emplean antenas de altas ganancias y de alta directividad, para compensar los elevados niveles de desvanecimiento que sufren las señales electromagnéticas. Los valores típicos de ganancia oscilan entre 10 y 15 dBi.

### 2.7.3. Polarización.

La polarización describe la naturaleza del vector de campo eléctrico radiado por la antena. En otras palabras, es la figura que se forma en el transcurso del tiempo por el vector instantáneo de campo eléctrico. Se pueden conseguir tres tipos de polarizaciones: lineal,

circular y/o elíptica. En las de tipo lineal, cuando el vector campo eléctrico es paralelo a la superficie de la tierra, se denomina polarización horizontal; cuando es perpendicular, se denomina vertical.

#### **2.7.4. Impedancia.**

Es la relación entre el voltaje y la corriente, medido en el puerto de la antena. Estos valores son dependientes de la forma de la antena, de la frecuencia de operación y de los objetos circundantes, entre otros. La impedancia de la antena es una variable importante a considerar, para alcanzar la máxima transferencia de potencia del transmisor a la antena, o de la antena al receptor. Esto se logra acoplado la impedancia de la antena con la impedancia de las líneas de transmisión.

### **2.8. Tipos de antenas.**

Desde el punto de vista de sus características y de las aplicaciones, las antenas se clasifican típicamente en cuatro grupos.

- Antenas eléctricamente pequeñas: La extensión de la estructura de la antena es mucho menor a una longitud de onda. Se caracterizan por tener bajos niveles de ganancia e impedancia.

- Antenas resonantes: Poseen un buen desempeño para anchos de bandas pequeños. Se puede conseguir antenas de este tipo con valores moderados de ganancia. La mayoría de las antenas empleadas en telefonía celular entran dentro de esta clasificación.

- Antena de banda ancha: El patrón de radiación y la impedancia permanecen constantes para un rango de frecuencia grande, y por eso se le conoce como de banda ancha. (Generalmente dentro de un 20%, para la relación entre la variación de la frecuencia, con respecto a la frecuencia central de operación)

- Antenas de apertura: Contienen en sus estructuras físicas una apertura por donde fluyen las ondas electromagnéticas. Se emplean en aplicaciones que requieren elevados valores de ganancia.

#### **2.8.1. Antenas Resonantes empleadas en telefonía celular.**

##### **2.8.1.1. Arreglo vertical de dipolos.**

Dado que el dipolo vertical posee un patrón omnidireccional, al apilar varios dipolos verticalmente, permite conservar el patrón, pero incrementa la ganancia. Una antena típica empleada en telefonía celular, emplea cuatro dipolos de media onda, separados

verticalmente por una distancia de una longitud de onda. Esta configuración arroja valores de ganancia de 8 dBi aproximadamente, con un ancho de rayo vertical de 6 grados.

Para poder obtener un patrón omnidireccional, es necesario alimentar a todos los elementos en fase. Al variar las fases de manera conveniente, se pueden obtener efectos favorables como la variación del ancho del rayo vertical y horizontal, el ángulo de inclinación del haz, etc.

En los diseños más modernos de antenas tipo panel para telefonía móvil, los dipolos apilados se colocan por delante de un plano reflexivo, produciendo un incremento en la ganancia, tanto en el plano horizontal como en el vertical.

## 2.9. Altura e inclinación de las antenas

La altura e inclinación de las antenas (del inglés *tilt*) juegan un papel muy importante en el diseño y optimización de los sistemas celulares, ya que impactan directamente en el área de cobertura de las estaciones radio base. El radio de cobertura de una estación viene dado por la ecuación (2.13).

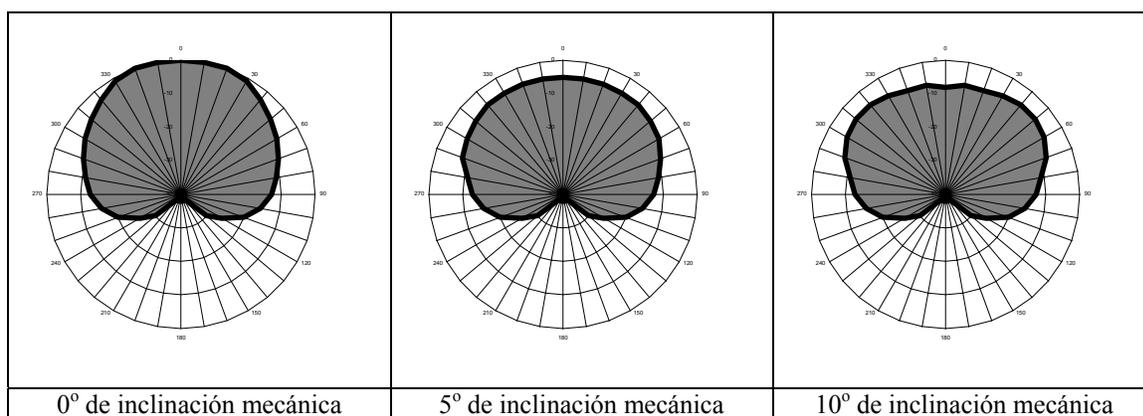
$$D = \left( \frac{P_t}{P_r} \right)^{1/4} (h_t h_r)^{1/2} [G_t G_r]^{1/4} (L_a)^{1/4} \quad (2.13)$$

Donde  $P_t$  y  $P_r$  son las potencias de transmisión y de recepción,  $h_t$  y  $h_r$  las alturas del transmisor y del receptor,  $G_t$  y  $G_r$  las ganancias de las antenas de transmisión y de recepción, y  $L_a$  el factor de corrección por pérdidas de difracción y otras. Como se puede apreciar en la ecuación (2.13), la cobertura es directamente proporcional a la altura de las antenas y a la ganancia de las mismas.

Las alturas en los sistemas celulares se ajustan según las condiciones del terreno que se quiere cubrir. Por ejemplo, en áreas rurales, donde se busca extender al máximo la cobertura de la radio base, se instalan torres de 75 a 100 metros de altura; en áreas suburbanas las alturas rondan los 50 metros; y en áreas urbanas, donde se requiere radio bases con coberturas reducidas para poder colocar más estaciones y así ganar en capacidad, se instalan antenas a 30 metros o inclusive menos.

La inclinación de las antenas hacia abajo (del inglés *downtilt*), permite mantener la energía de RF dentro del área de cobertura deseada, y además reduce la interferencia con estaciones vecinas. Al emplear la técnica de inclinación de las antenas, en unión con el incremento de la altura de las antenas, es cuando mejor se logra delimitar el área de cobertura de la estación. Adicionalmente, la inclinación de antenas también permite minimizar la dispersión por retardos debido a multi-trayectos, ya que el camino directo se refuerza en comparación con el camino de reflexión.

La inclinación de las antenas se puede lograr por medios mecánicos o eléctricos. De la manera mecánica, tan sólo se debe inclinar un cierto ángulo con respecto a la horizontal. En la inclinación eléctrica, las antenas ya vienen ajustadas de fábrica, de tal manera que el patrón vertical posee una cierta inclinación con respecto al horizonte. Los valores típicos de inclinación en los sistemas de telefonía celular varían entre 0 y 10 grados. En la práctica es recomendable emplear inclinaciones eléctricas, ya que para el caso mecánico se producen alteraciones en la ganancia y en el patrón horizontal, debido a la interacción de las antenas con los soportes, situación que no ocurre para la inclinación eléctrica. En la Figura 2.5, se muestra el comportamiento de los patrones horizontales de antenas, para diversas inclinaciones mecánicas.



**Figura 2.5.** Variación del patrón horizontal, con diversas inclinaciones mecánicas.

## 2.10. Sistemas de diversidad de antenas

La diversidad de antena es una técnica empleada para atacar el problema de recepción originado por los desvanecimientos de la señal radioeléctrica. Típicamente la diversidad se implementa en las estaciones radio bases, motivado al hecho de que los móviles transmiten a muy baja potencia y sus antenas son de baja ganancia.

La finalidad de la diversidad es tomar muestras independientes no correlacionadas de una misma señal, para combinarlas de cierto modo que al final se tenga una señal mejorada. Esto se fundamenta en que la probabilidad de que varias muestras diferentes se encuentren por debajo de cierto nivel, es mucho menor que la probabilidad de estar bajo ese mismo nivel, una sola de ellas.

La correlación es el parámetro medido en la radio base, que permite obtener la independencia de las señales, y con esto la proporción de desvanecimiento que puede ser reducido. La correlación varía según la técnica de diversidad empleada y de la dirección de origen de las señales de entrada. Generalmente se obtiene mejoras aceptables en la señal de recepción, con coeficientes de correlación de aproximadamente 0.7.

En los sistemas de telefonía celular se emplean típicamente dos modalidades de diversidad: la espacial y la de polarización.

### 2.10.1. Diversidad espacial de antenas.

La diversidad espacial se logra mediante la colocación de varias antenas separadas por una cierta longitud. El distanciamiento debe ser tal que las señales provenientes de las diversas antenas, no estén correlacionadas, o están cercano a no serlo. Una típica implementación de diversidad espacial, esta constituida por 3 antenas, una para la transmisión, y dos para la recepción. (Ver Figura 2.6). La diversidad espacial se emplea con frecuencia en las áreas rurales, donde ha demostrado tener buen desempeño, además, dado que en este tipo de áreas las antenas son soportadas por torres, no existe mayor limitación para colocar la cantidad de antenas requeridas.

La diversidad espacial se puede implementar horizontal o verticalmente. En el modo horizontal, se ha determinado experimentalmente que la separación de antenas debe ser 20 veces la longitud de onda, y se obtiene una ganancia con esta configuración de 3 a 5 dB. En el caso vertical, la separación requerida es de 15 longitudes de ondas, produciendo ganancias de diversidad de 2 a 4 dB. La razón del mejor desempeño de la configuración horizontal con respecto a la vertical, se debe a que la descorrelación crece más rápidamente en el caso horizontal.

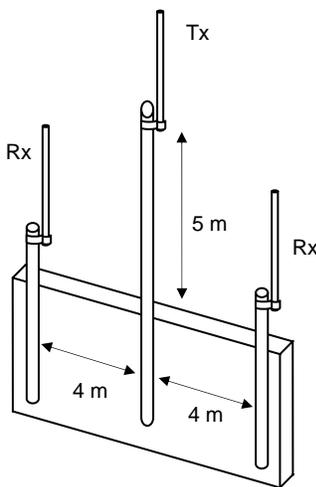


Figura 2.6. Implementación típica de un sistema con diversidad espacial, vertical y horizontal

### 2.10.2. Diversidad de polarización.

Las reflexiones que se producen en las áreas urbanas, generan una gama de señales que varían en su polarización, desde la vertical hasta la horizontal. Debido a esto, se pueden presentar señales que son ortogonales entre sí, y que posee coeficientes de correlación muy bajos. Así por ejemplo, se puede obtener ganancias en diversidad con un sistema donde una

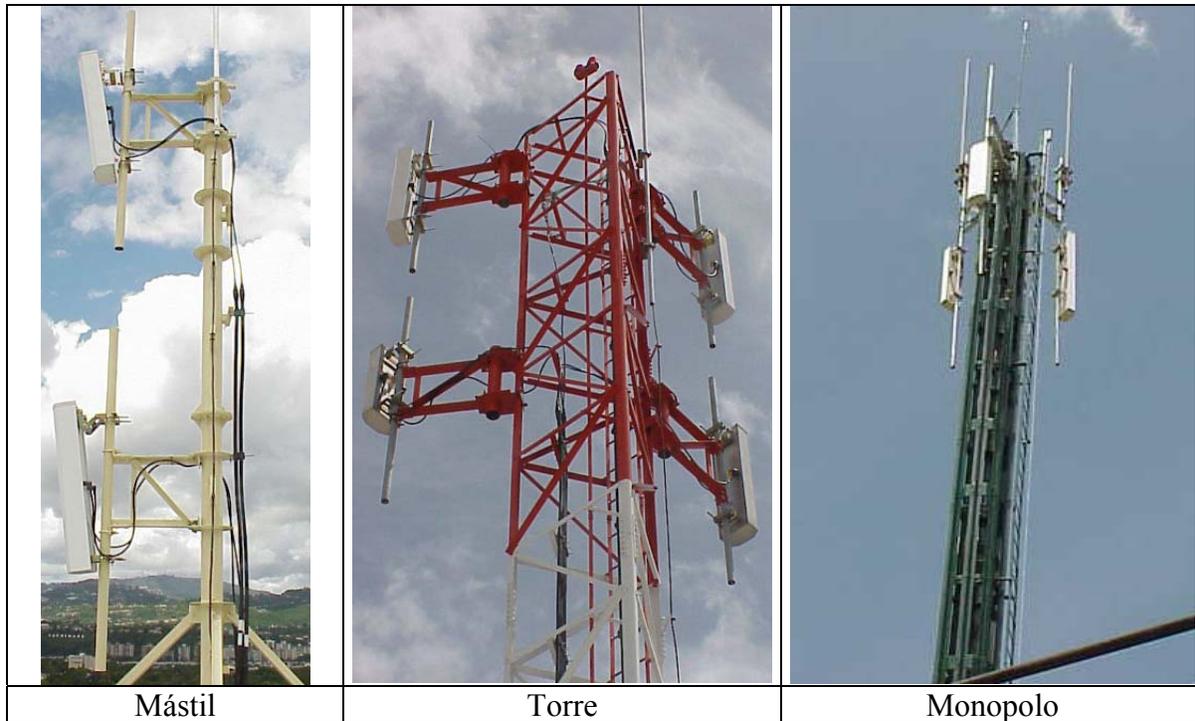
antena esté polarizada verticalmente, y otra horizontal. La ventaja está en que cuando las antenas poseen polarizaciones ortogonales, no se requiere ninguna separación espacial, por lo que en una misma estructura física, se puede colocar dos antenas polarizadas.

La diversidad en polarización trae muchos beneficios a los sistemas móviles. El hecho de tener en una sola antena, dos puertos con polarización cruzada, reduce de manera considerada las antenas requeridas para obtener ganancia de diversidad, aspecto importante en las áreas urbanas, donde los espacios disponibles son reducidos, y las permisos de instalación muy complicados de obtener.

## **2.11. Estructuras para soporte de antenas.**

Las antenas se suelen sujetar de estructuras que permiten colocar a las antenas a una cierta altura sobre el nivel del piso, y además brindan flexibilidad para los ajustes de la dirección azimutal y de la inclinación mecánica. Las estructuras deben ser lo suficientemente rígidas para soportar el peso de todas las antenas que se sujeten de ella y los efectos climáticos como temperatura, elementos corrosivos, etc. Debido a estas exigencias los materiales más empleados son los metálicos. En la Figura 2.7 se muestra los tres tipos más comunes de estructuras: la torre, el monopolo y el mástil.

El soporte tipo mástil es el más sencillo de implementar y el más económico. Se pueden construir mástiles de hasta 6 metros de alturas. Constituyen el soporte ideal para las azoteas de los edificios, debido a su poco peso y al poco espacio que ocupa. Como punto desfavorable, no soporta muchas antenas. El monopolo es la solución para alturas intermedias, entre 10 y 30 m de elevación. El perímetro que ocupa no es muy amplio, y soporta una buena cantidad de antenas. Por último, las torres son los soportes que brindan las máximas alturas (100 m), aunque también se pueden construir desde los 10 metros. Ocupan grandes extensiones y son muy costosas. Son empleadas típicamente en áreas rurales.



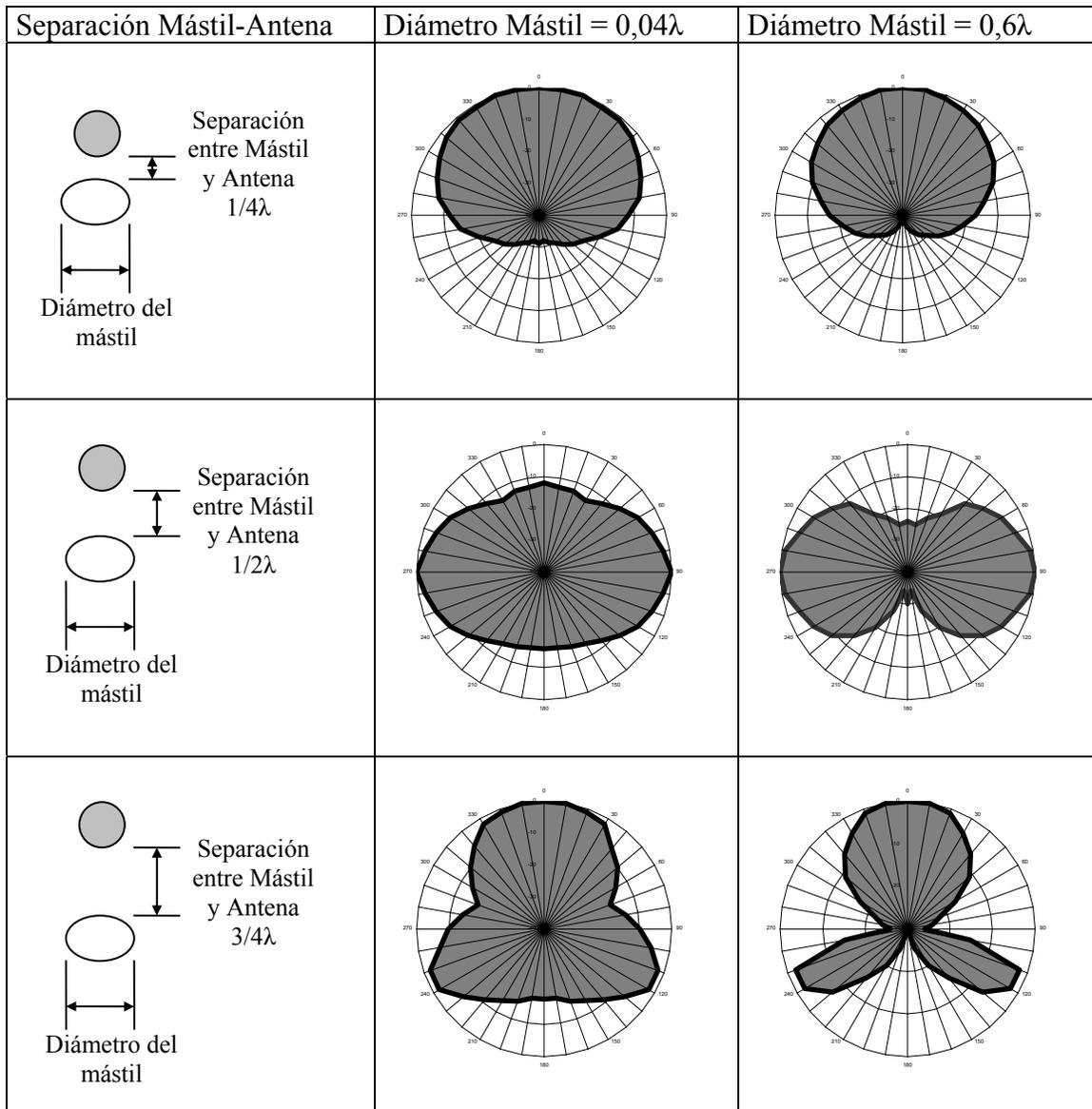
**Figura 2.7.** Tipos de estructuras para soportar las antenas.

### **2.11.1. Influencia de la estructura soportante en el diagrama de radiación de la antena.**

Dado que las estructuras para soportar a las antenas son de metal, se produce interacciones electro-magnéticas entre los elementos radiantes y el soporte como tal, que generan alteraciones al patrón de radiación de la antena. Dichas alteraciones van a estar directamente relacionadas a las características físicas del soporte, vértices, abrazaderas, escaleras; y de la separación existente entre la estructura y al antena.

#### **2.11.1.1. Interacción con mástiles cilíndricos y torres**

En los diagramas de la Figura 2.8 se muestra el impacto que produce un soporte tipo mástil en el patrón horizontal de una antena omnidireccional. La variación de la separación antena-soporte genera alteraciones impredecibles al patrón. Por ejemplo para una separación de un cuarto de longitud de onda se produce un diagrama direccional, para media longitud de onda se crea un diagrama bidireccional perpendicular a la línea de la antena, el cual podría ser apropiado para cubrir carreteras y líneas de ferrocarriles, por último para tres cuarto de longitud de onda, se genera un patrón de tres direcciones. La variación en el diámetro del mástil produce que la alteración debido a la separación antena-soporte, sea más o menos pronunciada.



**Figura 2.8.** Interacción de los mástiles con las antenas.

La interacción existente entre una antena direccional y un soporte tipo mástil o torre, va a ser menos significativa, ya que este tipo de antenas irradian la mayor parte de la energía hacia delante, y la que se propaga hacia atrás es muy poca, usualmente 20 dB o más de diferencia con respecto al frente. Esto reduce la cantidad de reflexiones de las ondas con el soporte, por lo que en definitiva el patrón va a ser muy similar al obtenido en los laboratorios de los proveedores.

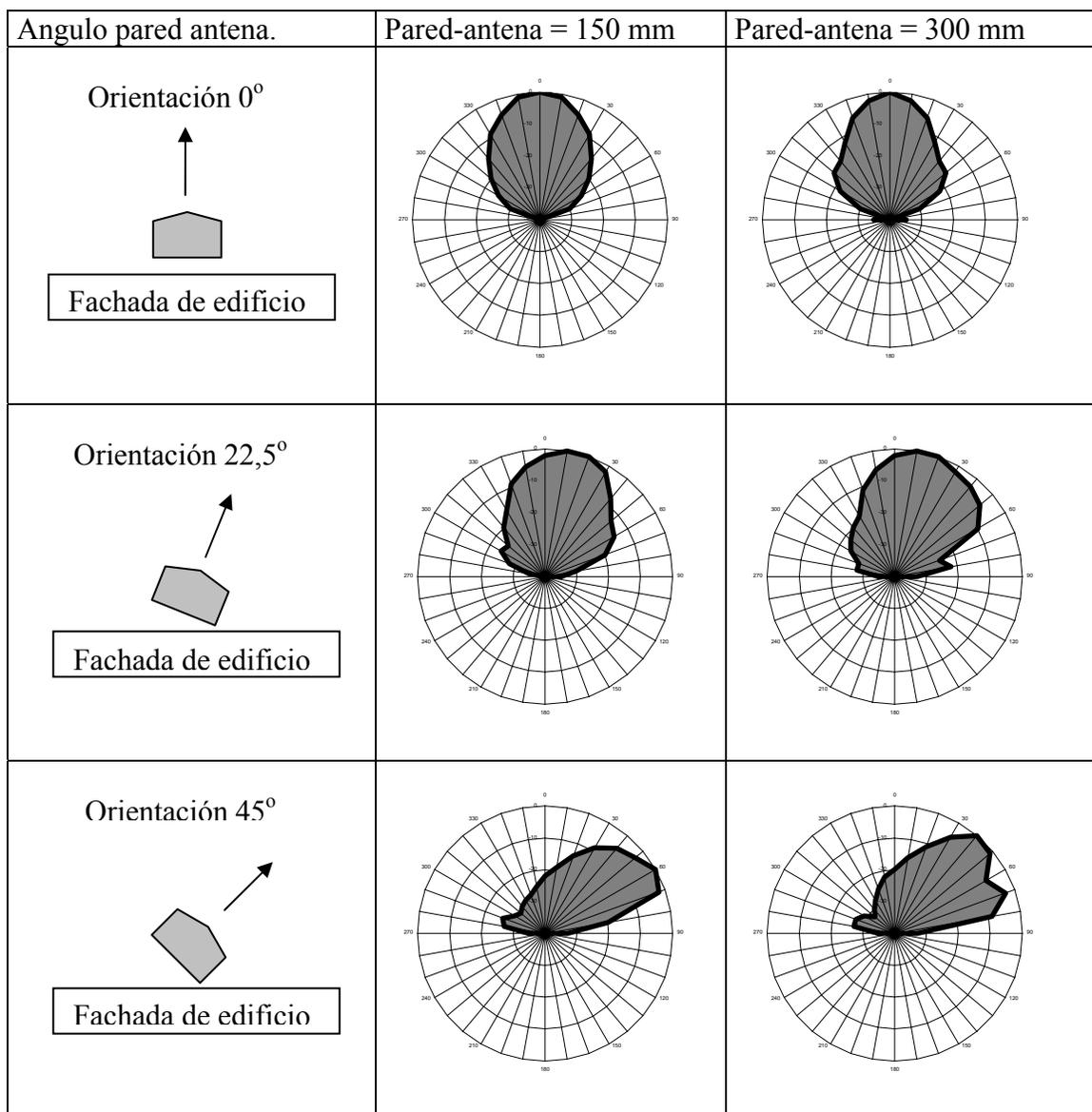
### 2.11.1.2. Montaje en paredes.

Las necesidades de cobertura en grandes ciudades y áreas urbanas a menudo obliga a disponer a las antenas en las fachadas de los edificios. La pared detrás de la antena se

convierte en un gran plano reflexivo que capta una importante radiación de la antena, la cual no puede ser despreciada. El ángulo formado entre la pared y el panel de la antena también tiene un impacto importante ya que cuanto mayor sea el ángulo, mayor será la radiación reflejada.

En los diagramas de la Figura 2.9, se muestra la variación que sufre una antena direccional de 65 grados de apertura, al ser sometido a diversos cambios de separación con respecto a la pared, y a la orientación azimutal de la antena.

En líneas generales se recomienda reducir al mínimo el espaciamiento de la antena, no emplear rotaciones azimutales con respecto a la pared superiores a los 20 grados, y no utilizar antenas cuyas aperturas horizontales sean superiores a los 65 grados



**Figura 2.9.** Patrones de radiación obtenidos en montajes de paredes

## **3. SISTEMAS CDMA 3G1X**

### **3.1. Introducción a CDMA.**

CDMA, acrónimo proveniente del inglés, que significa *Code Division Multiple Access*. Como su nombre lo indica, es un sistema para acceso múltiple basado en el ensanchamiento del espectro, donde todas las señales coinciden en tiempo y en frecuencia, en otras palabras, comparten el mismo espectro frecuencial. La energía de la señal de cada móvil es esparcida en todo el ancho de banda, y codificada de tal manera que los otros móviles del sistema la perciben como ruido. La identificación y demodulación en el receptor, se lleva a cabo mediante el empleo del mismo código empleado por el móvil para el ensanchamiento.

De los tres sistemas de acceso múltiple, CDMA, ha sido el de más reciente implementación. El que apareció en primera instancia, fue FDMA, sistema de acceso múltiple por división de frecuencia. En esta tecnología, cada usuario móvil tiene disposición total en tiempo de una porción del espectro. La banda total asignada, se divide en estrechas porciones de banda, llamadas canal, donde cada móvil, empleo uno de dichos canales. En la tecnología TDMA, acceso múltiple por división de frecuencia, se dispone de una parte del tiempo del espectro asignado. Se realiza de igual manera un fraccionamiento del ancho de banda total, para obtener canales de banda estrecha, pero a diferencia de FDMA, cada canal se divide en ranuras de tiempo, usualmente 3 o 6, que se repiten periódicamente. Por último en CDMA, el móvil posee disposición total del tiempo y del recurso espectral, y dispersa la energía de la señal en todo el ancho de banda. Los móviles y las estaciones base emplean códigos únicos para cada señal, para distinguir aquellas que son idénticas en tiempo y en frecuencia.

El estudio desarrollado en este trabajo se centra en la interacción que pueda tener las antenas inteligentes en la tecnología de acceso CDMA. Es por ello que en este capítulo se realiza un análisis de los detalles del protocolo y de los diversos procesos de llamada que se llevan a cabo en los sistemas CDMA, para posteriormente considerar los impactos que podrían tener las antenas inteligentes, en este tipo de sistemas.

### **3.2. Ensanchamiento del espectro de CDMA.**

#### **3.2.1. Ensanchamiento de espectro en secuencia directa.**

El proceso empleado en CDMA, que consiste en expandir mediante el empleo de códigos, la información contenida en un ancho de banda angosto en uno de mayor tamaño, recibe el nombre de ensanchamiento de espectro en secuencia directa. Este esquema de procesamiento, cumple los siguientes aspectos:

- La señal expandida posee un ancho de banda mayor que el mínimo ancho de banda requerido para transmitir la información, que para los sistemas digitales se denomina información de banda base.
- El ensanchamiento de la información se lleva a cabo mediante códigos, los cuales son independientes de los datos a transmitir y su tasa de transmisión es superior.
- En el receptor, el proceso inverso de ensanchamiento se realiza con una correlación cruzada de la señal recibida, con una réplica sincronizada del código empleado en la expansión.

### 3.2.2. Códigos empleados en CDMA.

Los códigos empleados en CDMA para el ensanchamiento del espectro, cumplen una serie de requerimientos matemáticos, que garantizan el correcto funcionamiento del proceso. En total son cuatro los códigos empleados: tres de ellos son secuencias pseudo aleatorias de ruido, y el cuarto es un código ortogonal. Cada uno de estos códigos se encargan de la “codificación” de una información específica, tanto en el sentido ascendente como en el descendente, sin embargo, se puede decir que la unión de los cuatro códigos constituye un código único, que en definitiva es el empleado para el ensanchamiento del espectro en los sistemas CDMA.

#### 3.2.2.1. Códigos Ortogonales.

Los códigos ortogonales son aquellos que cumplen la propiedad matemática de la ecuación (3.1).

$$\sum_{k=0}^{M-1} \phi_i(k\tau)\phi_j(k\tau) = 0 \quad i \neq j \quad (3.1)$$

Existen varias secuencias de código que cumplen la propiedad de ortogonalidad. En los sistemas CDMA, se emplea las secuencias llamadas Walsh y Hadamard. Para obtener los códigos en cuestión, se lleva a cabo un algoritmo, que genera una matriz cuadrada, llamada Hadamard.

Para crear una secuencia de dos códigos ortogonales, se arranca el proceso con una semilla igual a “0”. Esta semilla se repite en la derecha y abajo, y se invierte diagonalmente. Se tiene de esta manera, una matriz de 2 x 2. A continuación, se emplea la matriz de 2 x 2, como semilla para la matriz de 4 x 4, y se realiza el mismo proceso, repetir la semilla a la derecha y abajo, e invertir diagonal. Este proceso se realiza tantas veces, hasta alcanzar la dimensión de la matriz deseada. Para el caso de los sistemas CDMA IS-95, se emplea códigos de longitud 64, por lo que se debe realizar 6 veces. (Figura 3.1).

$$W_{2n} = \begin{matrix} W_n & W_n \\ W_n & \overline{W_n} \end{matrix} \quad W_1 = 0 \quad W_2 = \begin{matrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{matrix} \quad W_4 = \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{matrix}$$

**Figura 3.1.** Proceso para la generación de códigos Walsh.

El proceso de ensanchamiento del espectro mediante los códigos Walsh, se realiza a través de la operación lógica *XOR*. El resultado que se obtiene al operar “A” con el *XOR* de “0”, es igual a “A”, mientras que al operar “A” *XOR* “1” se obtiene el complemento de “A”. El proceso inverso de ensanchamiento se realiza de igual manera con la misma función lógica *XOR*, y con el mismo código Walsh.

La función de los códigos Walsh para los sistemas CDMA 3G1X, en el enlace de bajada, es la de canalizar. Cuando un móvil hace una petición de canal de tráfico, la radio base asigna un código Walsh para el ensanchamiento de la información a ser transmitida en el canal de tráfico, y a través del canal de voice, se le notifica al móvil cual es el código Walsh empleado, para que pueda realizar el proceso inverso al ensanchamiento.

### 3.2.2.2. Códigos Seudo-Aleatorios de Ruidos.

Los códigos Seudo-Aleatorios de Ruidos, comúnmente conocidos como los códigos PN, son secuencias no aleatorias y determinísticas, que se repiten de manera periódica, y que la frecuencia relativa de 0s y 1s es igual a ½.

Las secuencias PN se generan de la combinación de registros de corrimiento realimentados, conectados convenientemente y sincronizados por los pulsos de un reloj, de donde se obtiene un polinomio característico de la secuencia.

#### 3.2.2.2.1. Códigos PN cortos.

Son dos los códigos cortos empleados en los sistemas CDMA: el código *I* o en fase, y el código *Q* o en cuadratura. Ambos se obtienen de polinomios de grado 15, sus extensiones son de 32767 bits ( $2^{15} - 1$ ), y el período de repetición es 26,76 ms. En las ecuaciones (3.2) se muestra los polinomios característicos de las secuencias cortas I y Q.

$$\begin{aligned} P_I(x) &= x^{15} + x^{13} + x^9 + x^8 + x^7 + x^5 + 1 \\ P_Q(x) &= x^{15} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + 1 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Los códigos PN cortos se emplean para la modulación en fase y en cuadratura, y además, en el enlace descendente, identifican de manera única, a cada uno de los sectores de las radio bases del sistema.

### 3.2.2.2. Códigos PN largo.

El periodo de repetición de este código es apreciablemente más largo, se repite cada 41,42 días. El polinomio generador es de grado 42, y se muestra en la ecuación (3.3).

$$P_l(x) = x^{42} + x^{35} + x^{33} + x^{31} + x^{27} + x^{26} + x^{25} + x^{22} + x^{21} + x^{19} + x^{18} + x^{17} + x^{16} + x^{10} + x^7 + x^6 + x^5 + x^3 + x^2 + x + 1 \quad (3.3)$$

Los códigos largos cumplen la misma función tanto para los sistemas IS-95 como para los 3G1X. En el sentido de bajada, se emplea para dar privacidad a la voz, y en el sentido de subida, la función es la de identificar al usuario.

### 3.2.3. Procesamiento y codificación en el enlace de bajada.

En la Figura 3.2, se muestra el detalle completo de todos los pasos que transita la señal de voz digitalizada, antes de ser transmitida por el aire en el sentido descendente, es decir de la radio base al móvil.

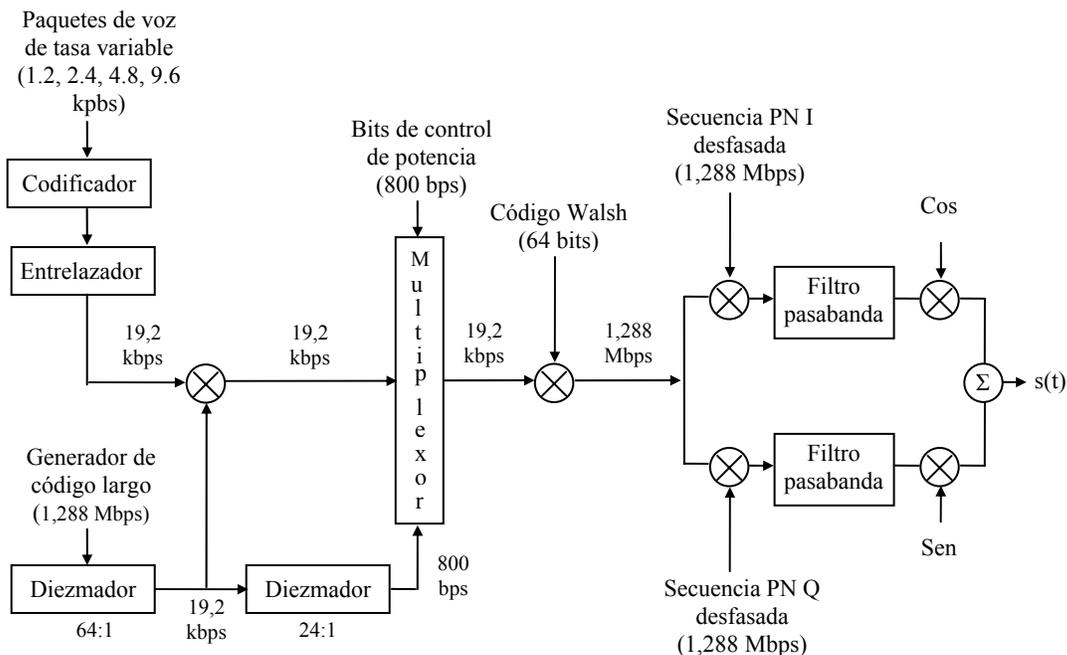


Figura 3.2. Procesamiento en el canal de tráfico descendente.

En los sistemas CDMA, cuando la voz se convierte de analógica a digital, se obtiene un caudal de información de 9600, 4800, 2400 o 1200 bps. En un momento dado, se transmitirá con alguna de las cuatro tasas, y va a depender de la actividad de la voz.

El primer procesamiento que se realiza a la voz digitalizada, es incrementar su tasa de transmisión a 19200 bps. Para lograr esto, se repite los bits de información, por un número  $n$  de veces, que dependerá de la tasa. Por ejemplo, si la voz se transmite a 9600 bps, se debe duplicar los bits para llevar la tasa a 19200 bps; si es 4800 bps, se debe multiplicar por cuatro, y así sucesivamente, con las restantes.

El siguiente paso consiste en “intercalar” el orden de los bits. Esto constituye un excelente mecanismo de diversidad, que contrarresta los errores consecutivos que se producen debido a los desvanecimientos. Al estar una misma información repetida y separada por un cierto lapso de tiempo, es mucho más probable que si se pierde un grupo de bits, se recupere luego en otro intervalo de tiempo.

El proceso de encriptación y ensanchamiento se inicia al realizar la operación XOR de la voz digitalizada, codificada e intercalada, con el código largo, que emplea para su generación, el serial electrónico del usuario. Después se realiza el ensanchamiento a 1,2288 Mbps con el código Walsh asignado para el canal de tráfico, y por último, se realiza el ensanchamiento con los códigos PNs cortos, asociados al sector que está manejando la llamada.

En la Figura 3.2, se observa que justo después de la operación XOR del caudal de información con el código largo, existe un multiplexor. Este es el encargado de intercalar los bits de control de potencia, dentro de la trama de información de voz. Los bits de control de potencia son comandos que envía la radio base al móvil, para que ajuste su potencia de transmisión, según un algoritmo propio de los sistemas CDMA. En el apartado 3.4.4 se amplía en detalle, los controles de potencia.

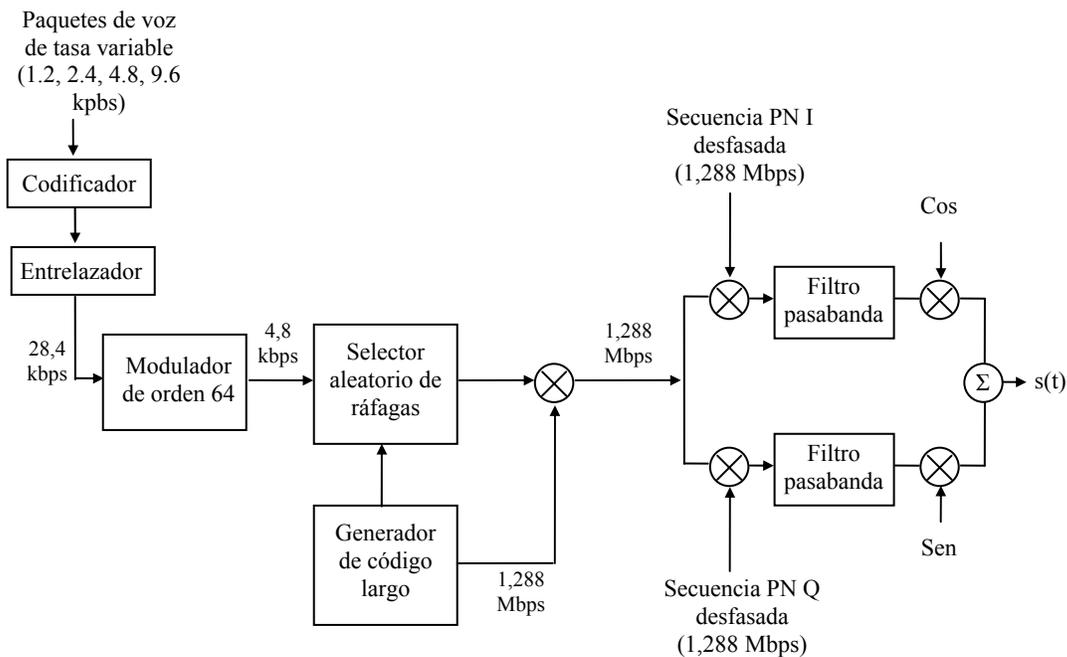
### **3.2.4. Procesamiento y codificación en el enlace de subida**

El procesamiento del canal de tráfico en el enlace de subida, presenta algunas diferencias en comparación al proceso del enlace de bajada (Figura 3.3). En la primera etapa, se dispone de las mismas cuatro tasas de transmisión, 9600, 4800, 2400 y 1200 bps. A este caudal se le aplica el proceso de repetición e intercalado de bits. La tasa final de este primer proceso es de 28800 bps, el doble en comparación con el enlace de bajada. La diferencia está en que el número de bits que se repite es dos veces mayor para el caso del enlace de subida.

La forma de emplear los códigos Walsh, también cambia. En el enlace de subida se utiliza para realizar una modulación de orden 64. Los bits que contienen la información de la voz, una vez repetidos e intercalados, se asocian en grupos de 6 bits, y se realiza un mapeo de este número con el código Walsh, y se sustituyen los 6 bits, por los 64 bits del

código Walsh correspondiente. Por ejemplo, si los 6 bits de entrada son 010100, esto corresponde al número 20, por lo tanto los 6 bits serán sustituidos por los 64 bits que corresponden al código Walsh número 20. Este proceso de modulación de orden 64 genera una tasa de 307 kbps.

La salida del modulador de orden 64 alimenta a un selector aleatorio de la ráfaga de información. Este aprovecha la actividad de la voz en el sentido de subida, para reducir la potencia del enlace en los períodos en que la voz está calmada. El efecto se logra a través del enmascaramiento de la información redundante y el patrón de la máscara depende de la tasa de transmisión de la voz. Para 9,6 kbps, no se produce ningún enmascaramiento, sin embargo cuando se trasmite a 1,2 kbps, es cuando se realiza el mayor enmascaramiento, ya que para esta tasa se repiten más los bits de información. El proceso realizado por el selector aleatorio, está controlado por el mecanismo de control de potencia del enlace de subida (Ver apartado 3.4.4.3). Cuando se le ordena al móvil que disminuya su potencia de transmisión, se le ordena que realice un mayor enmascaramiento de la información.



**Figura 3.3.** Procesamiento en el canal de tráfico ascendente

Por último, se realiza la fase final de ensanchamiento del espectro, mediante el *XOR* con el generador de código largo, y después con los códigos cortos en fase y en cuadratura.

### **3.3. Canales lógicos de CDMA.**

#### **3.3.1. Enlace de bajada.**

En el sentido descendente, se disponen de los siguientes canales: un canal piloto, un canal de sincronismo, hasta 7 canales de voice, y los canales de tráfico. Cada uno de estos se diferencian por el código Walsh que emplean.

El canal piloto tiene asignado el código Walsh 0, constituye la referencia para los móviles y es empleado por estos para la demodulación. Todos los canales pilotos de todas las estaciones bases, emplean el mismo código Walsh 0 y la misma secuencia pseudo aleatoria de ruido. La diferenciación de los sectores se logra al transmitir los códigos PN con una diferencia de fase única, que se incrementa cada 64 chips, por lo que se dispone de hasta 512 diferentes desfasajes.

La mayoría de los procesos que lleva a cabo el teléfono celular están gobernados por el canal piloto. El enganche inicial al sistema, se logra mediante la decodificación del canal piloto más fuerte, el relevo que realiza el móvil por las diversas radio bases del sistema, se soporta en las mediciones de los canales pilotos, e inclusive los procesos de control de potencia utiliza los niveles de este canal. Es por esta razón, que el canal piloto se transmite con mayor potencia en la estación base, usualmente entre 4 a 6 dB con respecto a los canales de tráfico.

El canal de sincronismo emplea el código Walsh número 32 y su tasa de transmisión es de 1200 bps. Juega un papel importante en el momento del enganche del sistema, ya que después de que el móvil decodifica el canal piloto, procede a leer el canal de sincronismo, de donde extrae el identificador del sistema, el identificador de la red, el desfase del código PN corto, el estado del código PN largo, y algunos datos que le permite al móvil sincronizar con precisión, sus procesos a los del sistema. El canal de sincronismo es modulado por el código Walsh 32 y por los códigos PN cortos.

Los canales de voice proveen al móvil de cierta información del sistema y de algunas instrucciones. Por ejemplo, cuando un móvil recibe una llamada, es notificado a través del canal de voice; de igual manera, los acuses de recibo de la radio base se envían por este canal. Dado que se pueden disponer de hasta 7 canales de voice, estos pueden usar los códigos Walsh del 1 al 7. El canal de voice es codificado de manera similar al canal de tráfico en el enlace de bajada, mediante un código PN largo para el canal de voice, el código Walsh del 1 al 7 y la secuencia PN corta, propia del sector.

Los canales de tráfico emplean todos los demás códigos Walsh no utilizados para los canales piloto, de sincronismo y de voice. La modulación del canal es la explicada en el apartado 3.2.3. En CDMA 3G1X, para la transmisión de datos de alta velocidad se emplea un canal de tráfico fundamental, y hasta 7 canales suplementarios. Mientras más alta sea la tasa de transmisión, mayor será el número de canales suplementarios requeridos. Es así que para una velocidad de 153 kbps, se requiere el canal fundamental más 7 canales suplementarios.

### **3.3.2. Enlace de subida.**

En el enlace de subida existen dos tipos de canales: el de acceso y el de tráfico. Ambos emplean el procesamiento explicado en el apartado 3.2.4, y se diferencian tan sólo en la secuencia del código largo, y en la tasa de transmisión, que para el caso del canal de acceso, está siempre en 4800 bps.

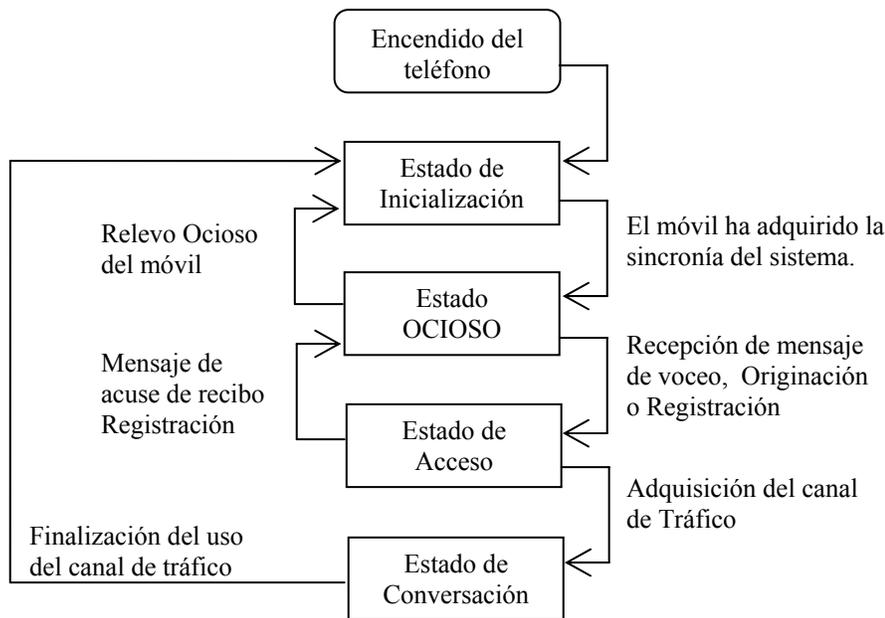
El canal de acceso, es un medio común de transmisión, donde todos los móviles se comunican con la radio base. Los mensajes típicos que se transmiten son: mensaje de registro al sistema, mensaje de originación de llamada, mensaje de respuesta a un voice, envío de mensaje corto SMS, etc.

### **3.4. Procesamiento de llamada.**

Existen 4 posibles estados donde se puede encontrar el teléfono móvil una vez que se enciende:

- Estado de inicialización: el móvil selecciona el sistema, el modo de operación, y se engancha al sistema seleccionado.
- Estado de Ocioso: el móvil monitorea los mensajes del canal de voice.
- Estado de acceso: El móvil envía un mensaje a la estación base, a través del canal de acceso.
- Estado de conversación: el móvil se comunica con la estación base empleando los canales de tráfico ascendente y descendente.

En la Figura 3.4 se muestra la relación entre los diversos estados, y los eventos que ocasionan cambios en los mismos.



**Figura 3.4.** Diagrama de estados del procesamiento de llamadas en los sistemas CDMA

### 3.4.1. Estado de Inicialización.

Este estado del procesamiento de llamadas puede ser dividido a su vez en tres etapas: determinación del sistema, adquisición del canal piloto y la adquisición del canal de sincronía.

- Determinación del sistema: el móvil selecciona el sistema a emplear a partir de unas prioridades que son configurables por el usuario. Típicamente los teléfonos móviles permiten buscar solo sistemas CDMA, o buscar sistemas CDMA y después sistemas analógicos, de igual manera para las bandas de frecuencia el teléfono puede buscar sólo la banda de 850 MHz o primero 850 y después 1900 MHz.

- Adquisición del canal piloto: en esta parte del proceso el móvil buscará decodificar un canal piloto en la frecuencia del sistema que seleccionó como preferente. De no lograrlo, intentará de nuevo con los otros sistemas permitidos, hasta que finalmente se logra el objetivo de esta etapa, la cual es engancharse a un canal piloto.

- Adquisición del canal de sincronía: una vez obtenido el canal piloto, el móvil intenta ahora decodificar el canal de sincronía, de donde extraerá información detallada del sistema al que se está enganchar, como por el ejemplo: el número de la revisión del protocolo, el número identificador del sistema, el número identificador de la red, la hora del sistema y el desfase de la secuencia PN del canal piloto, el estado del código largo, etc. Con toda esta información el móvil sincroniza todos sus procesos con los tiempos del sistema.

### 3.4.2. Estado Ocioso.

En este estado el móvil realiza dos tareas: primero, lee la información del canal de voceo para extraer los mensajes de parámetros del sistema, de acceso, de lista de vecinos y de voceo; y segundo, mide la intensidad del canal piloto de la estación base servidora y de los pilotos vecinos. Con esto último el móvil verifica si existe algún piloto que sobrepase en intensidad al piloto activo, para entonces iniciar un proceso de relevo ocioso, que consiste en reengancharse con el piloto de mayor intensidad.

### 3.4.3. Estado de acceso al sistema.

Son tres los casos por los cuales el móvil intenta tener acceso al sistema: cuando el usuario genera una llamada, cuando el móvil ha recibido un voceo indicándole que tiene una llamada y cuando el móvil requiere enviar a la radio base un mensaje de registro. Para todos estos casos se lleva a cabo un procedimiento de naturaleza aleatorio, que minimiza la interferencia entre usuarios, ocasionado por el hecho de que todos emplean el mismo canal de acceso. La información enviada en el “mensaje de parámetros de acceso”, transmitida por el canal de voceo, es la que establece el desenvolvimiento del procedimiento de acceso.

Se conoce como intento de acceso al proceso completo de responder un mensaje enviado por la radio base, y recibir un mensaje de confirmación de recibido. En un mismo intento de acceso se realizan varias transmisiones de la misma información que se llaman pruebas de acceso, las cuales a su vez se agrupan en secuencia de pruebas de acceso (Figura 3.5).

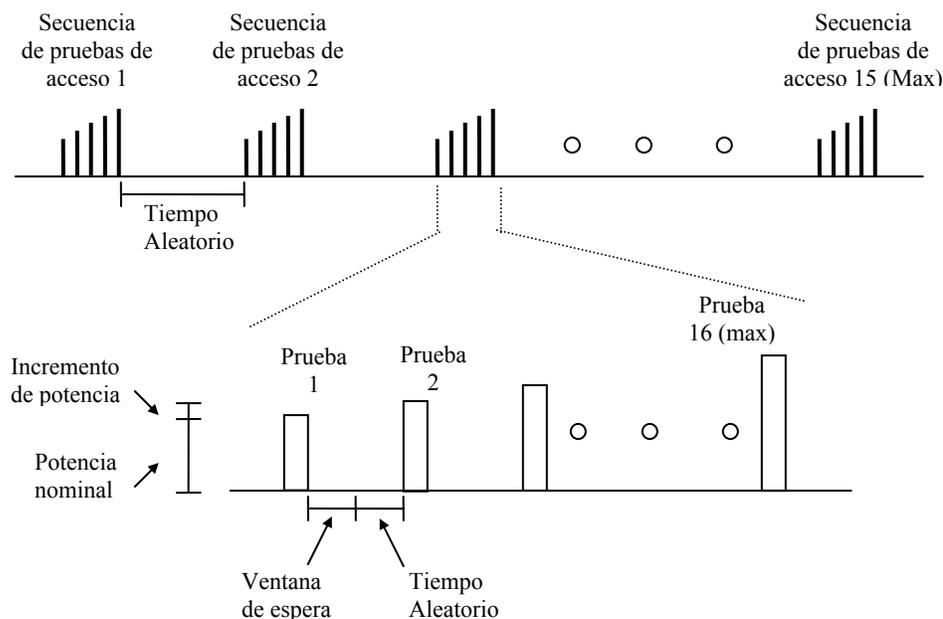


Figura 3.5. Mecanismo de un intento de acceso

El proceso se inicia con la primera prueba de acceso de la secuencia número uno. Se transmitirá la información con una potencia nominal y el tiempo inicial será retardado de manera aleatoria con respecto al inicio de la trama, esto para minimizar la colisión entre usuarios. El móvil esperará un tiempo por la respuesta del sistema. De no recibirla, esperará de nuevo un tiempo aleatorio para transmitir la misma información, pero ahora con un nivel de potencia superior al anterior. El proceso se repetirá hasta que se reciba la respuesta, o hasta que se llegué al límite de pruebas de acceso para una secuencia. De ocurrir esto último, se esperará otro tiempo aleatorio, para dar inicio a la siguiente secuencia de acceso. La potencia de transmisión de la prueba de acceso de la siguiente secuencia volverá a la potencia nominal, y de igual manera irá aumentando para las siguientes pruebas de acceso.

#### **3.4.4. Estado de conversación.**

Esta fase se divide en establecimiento del canal de tráfico, la conversación como tal, y por último la culminación de la misma.

##### **3.4.4.1. Establecimiento del canal de tráfico.**

Una vez culminado satisfactoriamente el acceso a la radio base, el sistema se encargará de realizar la asignación del canal de tráfico. El primer paso consiste en reservar los elementos de hardware de la radio base encargados del manejo de la interfaz de aire. De tener disponibilidad de recursos, se configura los mismos para que puedan manejar el tipo de servicio que está demandando el móvil, por ejemplo, servicio de voz, datos, fax, etc. Inmediatamente se inicia un proceso llamado confirmación del canal de tráfico, en el cual tanto la radio base como el móvil envían tramas en ambos sentidos, con la finalidad de verificar la confiabilidad del medio de transmisión. Si en un determinado tiempo, no se recibe un cierto número de tramas correctas, la radio base envía un mensaje cancelando la llamada y reiniciando el proceso. De lo contrario, el móvil envía el mensaje de alerta al usuario, y se espera hasta que alguna de las dos partes responda, dando inicio al estado de conversación.

##### **3.4.4.2. Algoritmos de relevo.**

Se entiende por relevo, el proceso de transferencia del control de la llamada de una radio base a otra, cuando el móvil se encuentra en estado de conversación. En los sistemas tradicionales analógicos y TDMA, se lleva a cabo el relevo del tipo “duro”, donde el traspaso de una radio base a la otra, implica ajuste de frecuencia, y el control de la llamada es realizado por una sola estación.

En el sistema CDMA el esquema es diferente, se lleva a cabo el relevo “suave”. Este consiste en realizar la transferencia de manera compartida, es decir, a medida que el móvil se desplaza por las diversas zonas de cobertura, el control lo pueden realizar simultáneamente varias radio bases. Este mecanismo es mucho más robusto, ya que si por

alguna razón, en un momento dado en que el control lo ejercen dos radio bases, una de ellas no puede continuar con esa labor, la otra sigue manteniendo la llamada.

#### **3.4.4.2.1. Listas de Pilotos en el relevo CDMA**

El relevo suave de CDMA se fundamenta en las mediciones de los niveles de energía de los canales pilotos del sistema, y de la clasificación que se realizan a los mismos a partir de las mediciones realizadas.

Todos los pilotos detectados pueden estar en alguno de los siguientes grupos:

- Lista de activos: contiene a los canales pilotos que tienen asociados los canales de tráfico que emplea el móvil. En otras palabras, en la lista de activos se encuentran los canales pilotos de las radio bases con las cuales se esta comunicando el móvil en el estado de conversación. Generalmente se pueden tener hasta 3 canales en la lista de activos, sin embargo, el estándar permite hasta un máximo 6 pilotos. Típicamente en la lista de activos se encuentran aquellos pilotos que son captados con mayor intensidad por el teléfono móvil.
- Lista de candidatos: como su nombre lo indica, en este grupo se encuentran los pilotos que debido a que son captados por el móvil con suficientes niveles de energía, son “candidatos” para iniciar el proceso de relevo suave que los llevaría al grupo de pilotos activos.
- Lista de vecinos: son los canales pilotos asociados a aquellas radio bases que se encuentran próximas a las radio bases activas, por lo que en algún momento, alguna de ellas podría ser captada con suficiente intensidad y así iniciarse un proceso de relevo, donde el canal piloto pasará al grupo de candidatos y después al de activos. Para que un piloto pase del grupo de vecinos al grupo de candidatos, debe superar un umbral de energía definido por el sistema. En la lista de vecinos se pueden tener hasta 20 canales pilotos.
- Lista de restantes: son todos aquellos pilotos que son captados por el móvil, y que no cumplen las condiciones para estar en cualquiera de las tres listas previas.

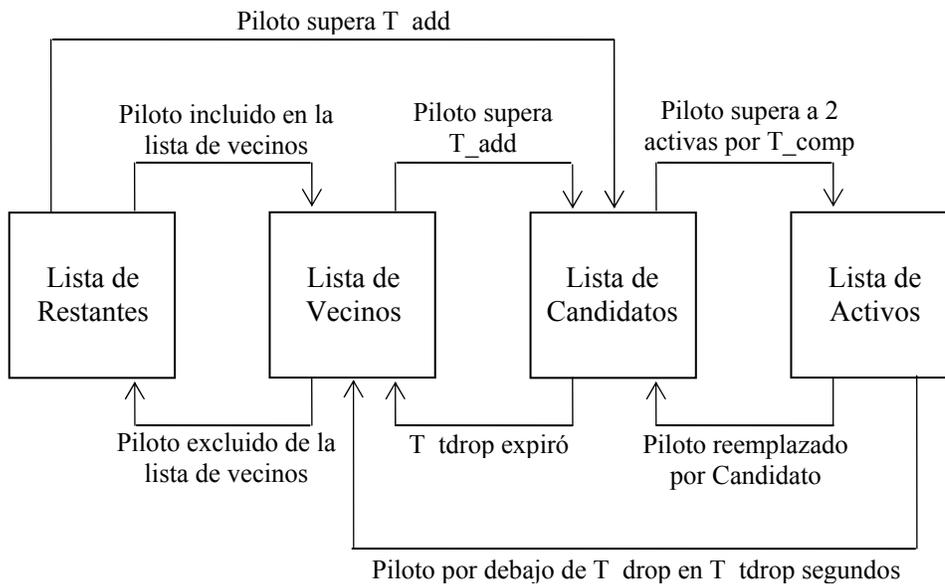
#### **3.4.4.2.2. Umbrales para la transición de los pilotos**

El paso de los pilotos por las diversas listas está determinado por 3 umbrales de nivel de señal, que controlan el proceso de relevo.

- Nivel para la adición ( $T_{add}$ ): cuando un piloto de la lista de vecinos o de restantes es captado por el móvil con un nivel de señal igual o superior a  $T_{add}$ , este es cambiado a la lista de candidatos. Justo después, el móvil notifica a las radio bases activas que existe un nuevo piloto listo para ser incluido en el grupo de activos.

- Nivel de comparación ( $T_{comp}$ ): cuando un piloto pasa a la lista de candidatos, este se trasladará inmediatamente a la lista de activos, si aun existe espacio disponible en esa lista, es decir, si existen menos de tres pilotos. En el caso contrario, el sistema empleará el umbral  $T_{comp}$ , para determinar si realmente el nuevo candidato es un piloto más apropiado para la lista de activos. Si la señal con que el móvil capta al piloto candidato es superior a dos de los activos más débiles en una cantidad de al menos  $T_{comp}$ , entonces el candidato reemplazará al activo más débil. De no ocurrir lo planteado, el candidato conservará su condición hasta que se produzca otro evento que lo saque de ese estado.
- Nivel para la eliminación ( $T_{drop}$ ): es el umbral que transfiere un piloto de la lista de activos a la de vecinos. Cuando el nivel de señal de un piloto se encuentra por debajo del  $T_{drop}$ , se inicia un contador llamada  $T_{tdrop}$ , que se encargará de medir si el piloto se encuentra por debajo de  $T_{drop}$  por un determinado tiempo, para de esa manera lleva a cabo el cambio de estado de activo a vecino.

En la Figura 3.6, se muestra la interacción de las diversas listas junto con los umbrales que disparan los cambios de estados.



**Figura 3.6** Transiciones entre las listas de pilotos en el proceso de relevo

### 3.4.4.3. Control de potencia.

El objetivo primordial del control de potencia es el de alcanzar un equilibrio entre la calidad de voz y el número de usuarios del sistema, además de disminuir el consumo de potencia de los transmisores de la radio base y alargar el tiempo de duración de las baterías de los teléfonos.

Existen mecanismos de control de potencia tanto para el enlace de bajada, como para el enlace de subida. Este último a su vez, posee dos tipos de controles, el de lazo abierto, que es un proceso autónomo del teléfono, y el de lazo cerrado, el cual es dirigido por la estación radio base. Para el enlace de bajada tan solo existe un mecanismo de control, y es de lazo cerrado.

#### **3.4.4.3.1. Control a lazo abierto del enlace de subida.**

Este tipo de control se lleva a cabo, a partir de la medición realizada por el móvil de la potencia total recibida por él. Con esta información se realiza el ajuste; a mayor potencia recibida, menor será la potencia transmitida por el móvil.

El hecho que la señal recibida sea fuerte, indica o que el móvil se encuentra cerca de la radio base, o que el camino de propagación es bueno. Esto permite al móvil usar menos potencia de transmisión y aun generar una buena señal en la radio base, reduciendo así la interferencia a las otras estaciones.

El mecanismo de control de potencia a lazo abierto, es útil para el establecimiento del enlace en el momento de la originación de las llamadas y como respuesta a las prolongadas variaciones de las pérdidas por propagación. La desventaja principal del proceso es su lentitud, aspecto que se corrige con el proceso de lazo cerrado.

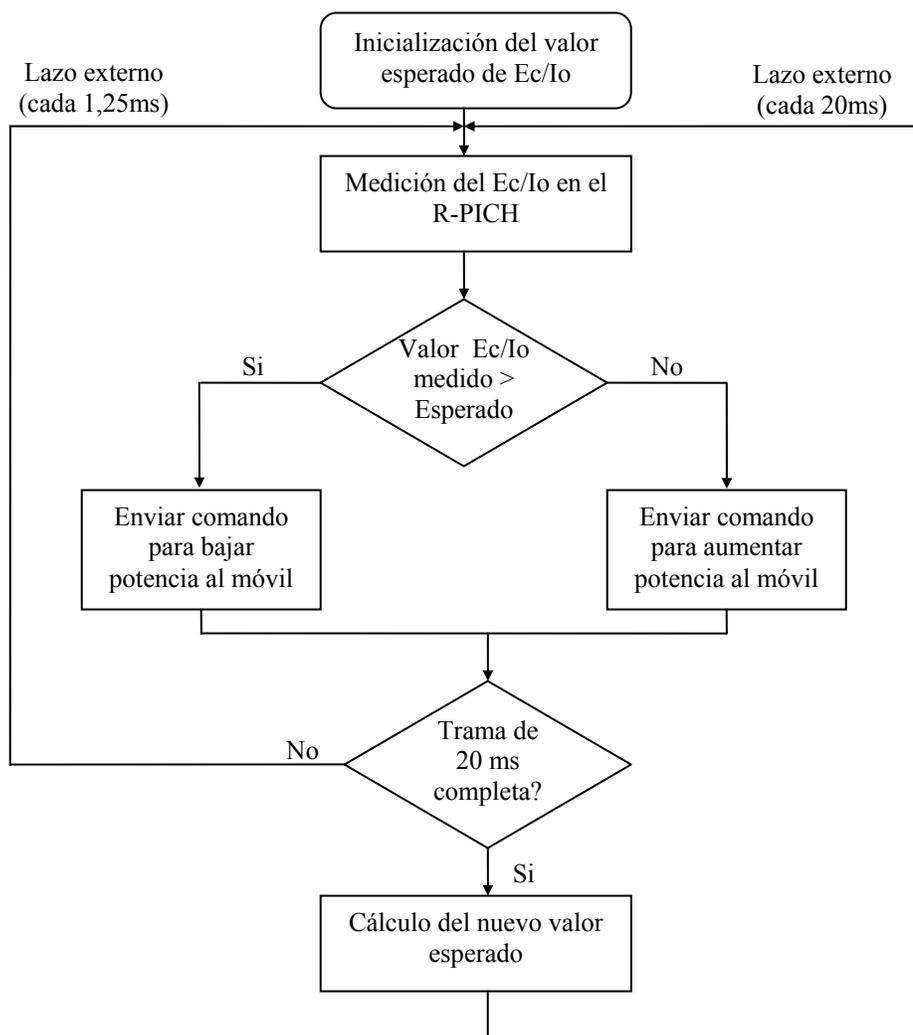
#### **3.4.4.3.2. Control a lazo cerrado del enlace de subida.**

El mecanismo de control de lazo cerrado, se sustenta de dos parámetros indicativos de la calidad de voz de la llamada: el  $E_b/N_0$ , que es el promedio de la energía de bits recibidos comparado con respecto al total de interferencia, y el  $FER$ , que es la tasa de tramas erradas.

El proceso se sincroniza una vez finalizado el envío de una trama, cada 20 milisegundos, y es en ese instante cuando se realiza el mecanismo conocido como lazo externo. A su vez, para cada proceso de lazo externo se realizan hasta 16 ciclos del lazo interno, con periodos de duración de 1,25 milisegundos.

El algoritmo se inicia con el ciclo de lazo interno, donde la radio base compara el  $E_b/N_0$  recibido, con respecto al valor esperado para este parámetro. Si el valor obtenido está por encima del valor esperado, la radio base ordena al móvil que disminuya su potencia de transmisión en 1 dB, de ocurrir lo contrario, le ordenará que incremente en la misma cantidad, 1 dB. Este proceso se repite 16 veces hasta que se reciban todos los bits pertenecientes a la misma trama. Cumplido esto, la radio base realizará el proceso de lazo externo, donde determinará el nuevo valor esperado para el  $E_b/N_0$ , basado en los errores en la trama. El nuevo valor esperado se utilizará en los procesos de lazo interno que se realizarán a continuación.

En los sistemas CDMA 3G1X se incluyeron pequeñas variaciones al proceso de control de potencia de lazo cerrado en el enlace de subida. La más resaltante es que se mide el  $E_c/I_o$  del canal piloto del enlace de reverso (*R-PICH  $E_c/I_o$* ) en vez del  $E_b/N_o$  del canal de tráfico. De esta manera, si el  $E_c/I_o$  es menor que el valor esperado, la estación base envía un comando de incremento de potencia, en caso contrario, se enviará un mensaje de disminución de potencia. El lazo interno de control se realiza con el mismo período de 1,25 ms. Finalmente, el lazo externo ajustará el valor esperado de  $E_c/I_o$  a partir de las mediciones de *FER*. En la Figura 3.7 se muestra el proceso de control de potencia para el enlace de subida, en los sistemas CDMA 3G1X.



**Figura 3.7** Control de potencia para enlace de subida en los sistemas 3G1X

#### **3.4.4.4. Control de potencia del enlace de bajada.**

El algoritmo de control de potencia del enlace de bajada, es el encargado de ajustar de manera independiente, la potencia de transmisión de la radio base para cada uno de los canales de tráfico. La finalidad del proceso es la de alcanzar los valores de *FER* deseados en las señales recibidas por el móvil.

El proceso de control de potencia arranca en el mismo momento en que se inicializa la llamada, donde la potencia del canal de tráfico se ajusta al valor predeterminado que tiene el sistema. El móvil detecta las tramas erradas y envía un reporte a la estación base, la cual incrementará la potencia si se produjeron errores, o la disminuirá si no se presentaron. El móvil puede enviar los reportes de errores periódicamente, o lo puede enviar cuando se excede un cierto umbral.

El mecanismo descrito anteriormente es el implementado en los sistemas de IS-95. Para 3G1X se incluyó un proceso que es similar en cuanto al algoritmo, al control de potencia de lazo cerrado del enlace de subida de IS-95, con un lazo externo y otro interno.

El móvil continuamente monitorea el canal de tráfico de bajada a través de la medición del *Eb/No*. Si el enlace se degrada, el móvil le indica a la estación que incremente la potencia del canal de tráfico, a través del sub-canal de control de potencia del enlace de subida. Para el caso contrario, si la calidad del enlace de bajada excede el valor esperado, se indica a la estación base que disminuya la potencia del canal de tráfico. Este proceso, llamado de lazo interno, se realiza con una frecuencia de 800 Hz. Por último a una tasa de 50 Hz, se realiza el lazo externo del proceso, que es el que permite que se ajuste el valor esperado del *Eb/No*, que se utilizará después en el lazo interno.

## **4. ANTENAS INTELIGENTES**

### **4.1. Introducción**

Se entiende por antenas inteligentes, al sistema constituido por arreglos de elementos radiantes en combinación con una parte de control, encargado del procesamiento de las señales. Son varios los beneficios que se obtienen al implementar este tipo de tecnología, donde destaca principalmente las mejoras en cobertura y en desempeño.

En este capítulo se discutirán los conceptos básicos relacionados con las antenas inteligentes, las diversas clasificaciones de estas y el conjunto de implementaciones posibles a los sistemas de telefonía celular.

### **4.2. Beneficios Potenciales de las antenas inteligentes**

#### **4.2.1. Incremento de la cobertura.**

Las antenas inteligentes proveen mejoras en la cobertura de las radio bases, a través de la extensión del alcance de las señales. Como se discutió en el capítulo 2, la potencia de recepción depende directamente de la ganancia de las antenas, entonces, al aumentar esta variable, como en efecto se puede lograr con las antenas inteligentes, se puede incrementar la potencia de recepción, o se puede tolerar mayores pérdidas de camino, o se puede transmitir a mayor distancia.

Este aspecto a su vez trae una implicación importante para los costos de implementación. Al incrementar el rango de alcance de las radio bases, permite reducir el número de estaciones que se necesitarían, en comparación con las antenas convencionales.

#### **4.2.2. Reducción de la dispersión de retardos y del desvanecimiento.**

Las dispersiones de retardos son causadas por las propagaciones multi-camino, donde la señal originada por una única fuente, viaja por diversas direcciones y diversas distancias, llegando al destino con retardos relativos. En el modo de transmisión, la antena inteligente está en capacidad de enfocar la energía en una dirección dada, aminorando las reflexiones múltiples que ocasionan la dispersión de retardos. Para el caso de la recepción, las antenas inteligentes cuentan con dos mecanismos para atacar el problema, el primero, mediante un proceso de combinación para compensar los retardos, y segundo, mediante la formación de lóbulos nulos que cancelen aquellas señales que no pueden ser compensadas.

### **4.2.3. Patrones de radiación ajustables.**

En los esquemas tradicionales de los sistemas de telefonía inalámbrica, se emplea el concepto de sectorización, para fraccionar la cobertura de un área. Por ejemplo, se podría tener una radio base que contiene tres sectores, cada uno con un lóbulo de radiación de  $120^\circ$ , logrando así una cobertura completa de  $360^\circ$ . Para estos casos, cada lóbulo puede ser considerado como una radio base aparte, con sus asignaciones de frecuencias y recursos por separado. La sectorización es de gran utilidad ya que reduce la interferencia co-canal, y aumenta la capacidad del sistema.

Con la implementación de antenas inteligentes, la sectorización se puede explotar aun en mayor medida. Para un sector dado, se crean otros lóbulos que dan cobertura a diferentes móviles, o a grupos de ellos. Cada lóbulo se considera como una celda co-canal, por lo que emplea los mismos recursos. Además, los lóbulos se pueden ajustar según las condiciones de tráfico que tuviese el sector para el momento. En un futuro cercano se espera que los lóbulos puedan seguir el movimiento de móvil.

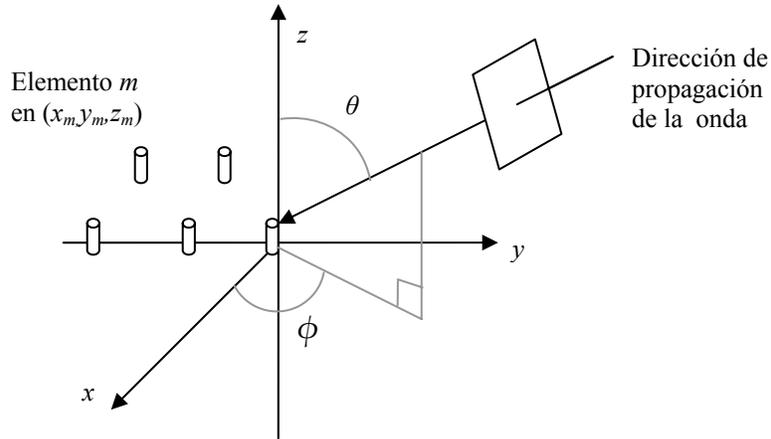
Las antenas inteligentes también crean lóbulos nulos, o áreas de baja radiación. Esto permite reducir interferencias co-canales, tanto en el enlace de subida como en el enlace de bajada.

### **4.2.4. Incremento de la capacidad y de la eficiencia espectral.**

La eficiencia espectral se refiere a la cantidad de tráfico que un sistema puede manejar, tomando en consideración los recursos del espectro asignado. Por lo tanto, al incrementar el número de usuarios que pueden emplear el sistema, manteniendo la calidad del desempeño de la llamada, se aumenta la eficiencia espectral. Como ya se mencionó en los puntos anteriores, con las antenas inteligentes se puede reducir las interferencias co-canales y los desvanecimientos multitrayecto, además que permite que el móvil transmita con menos potencia, estos tres aspectos permite aumentar la cantidad de usuarios simultáneos que se pueden comunicar en una radio base.

## **4.3. Tecnología de las antenas inteligentes**

Un sistema de antenas inteligentes está conformado por un arreglo de antenas de baja ganancia, conectados a una red combinatoria. En la Figura 4.1, se muestra un arreglo de antenas que puede ser empleado para constituir un sistema inteligente. Allí, el ángulo azimutal se representa con el símbolo  $\phi$ , y el ángulo de elevación con  $\theta$ .



**Figura 4.1.** Geometría emplea en el estudio de los arreglos de antenas.

Para llevar a cabo el análisis de los arreglos de antenas, es importante tomar en cuenta los siguientes aspectos:

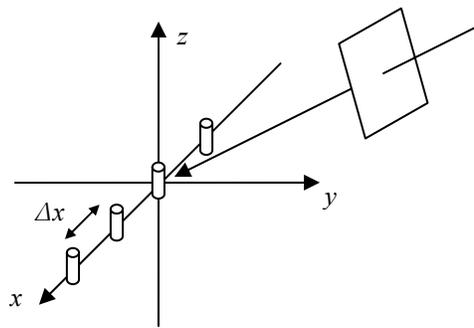
- La separación entre los elementos del arreglo es suficientemente pequeña, para considerar que no existe variación de la amplitud de la señal recibida por los diferentes elementos.
- No existe acoplamiento mutuo entre los diferentes elementos, considerando una separación suficientemente grande entre ellos.
- Existe un número finito de campos incidentes al arreglo.
- El ancho de banda de la onda incidente es pequeño en comparación con la frecuencia de la portadora.

Para una onda plana proveniente de una fuente ubicada en el campo lejano, y que incide en el arreglo en la dirección  $(\theta, \phi)$ , la diferencia de fase entre la onda que incide en el elemento  $m$ , ubicado en posición  $(x_m, y_m, z_m)$  y la onda incidente en el elemento de referencia ubicado en el origen, viene dado por la ecuación (4.1):

$$\Delta\Psi_m = \beta\Delta d_m = \frac{2\pi}{\lambda}(x_m \cos\phi \sin\theta + y_m \sin\phi \sin\theta + z_m \cos\theta) \quad (4.1)$$

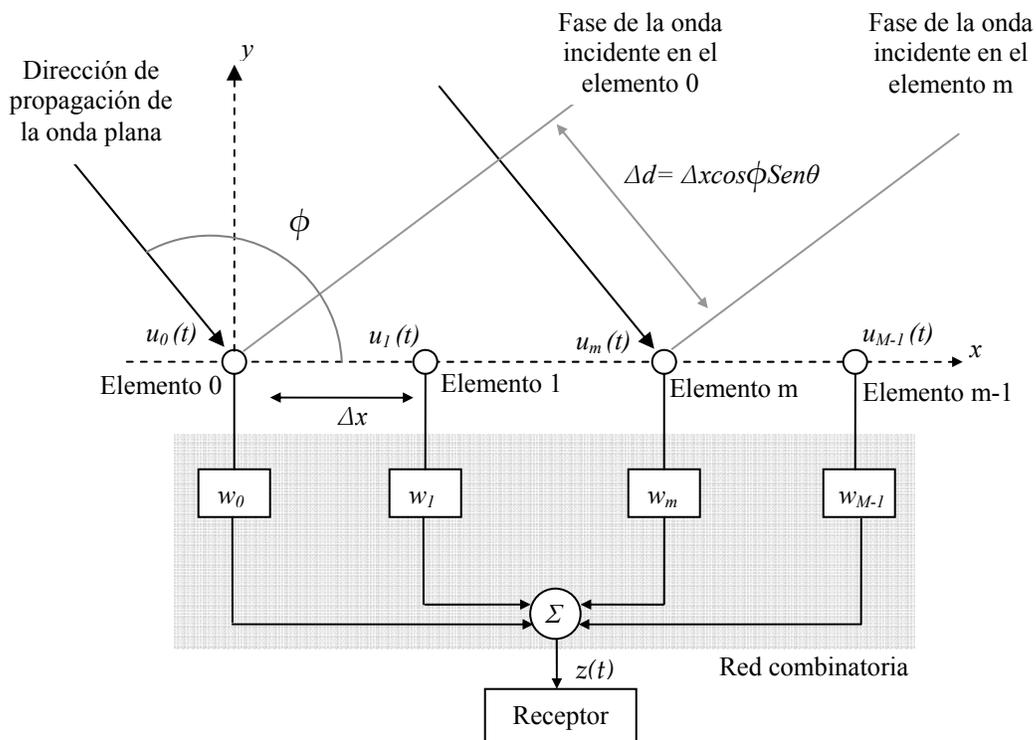
El símbolo  $\beta$  representa el factor de propagación de fase,  $\lambda$  la longitud de onda, la cual puede ser calculada mediante la expresión  $\lambda=c/f$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz, y  $f$  la frecuencia de la portadora.

En general, los elementos de un arreglo de antenas, pueden estar dispuestos espacialmente de cualquier manera, sin embargo, los que se implementan con mayor frecuencia, son los arreglos lineales de elementos separados por distancias iguales. El análisis que se realizará a continuación considera este tipo de arreglo, como se muestra en la Figura 4.2, donde se dispone de  $M$  elementos, orientados en el eje de las  $X$ , y con una separación de  $\Delta x$ .



**Figura 4.2.** Geometría de un arreglo de antenas dispuesto de manera lineal.

El sistema de antenas inteligentes se completa con los ponderadores de elementos  $w_m$ . Cada uno de estos, se conecta a su respectivo elemento de antena, como se muestra en la Figura 4.3. El factor de ponderación  $w_m$ , tiene una amplitud y una fase asociado a él.



**Figura 4.3.** Sistema de arreglo lineal con la red de ponderadores

Se considerará una onda plana que incide sobre el arreglo con un ángulo relativo con respecto al eje  $x$  ( $\theta, \phi$ ). La modulación de la información banda base en la frecuencia de la portadora se representará con la expresión  $s(t)$ , y se asumirá también que los elementos del arreglo son antenas isotrópicas con ganancia uniforme en todas las

direcciones. Con todas estas premisas, se tiene que la señal recibida en el elemento  $m$  del arreglo lineal viene dado por la ecuación (4.2):

$$u_m(t) = As(t)e^{-j\beta m\Delta d} = As(t)e^{-j\beta m\Delta x \cos \phi \sin \theta} \quad (4.2)$$

La letra  $A$  de la ecuación anterior representa una constante de ganancia arbitraria. La señal  $z(t)$ , resultante a la salida del arreglo es:

$$z(t) = \sum_{m=0}^{M-1} w_m u_m(t) = As(t) \sum_{m=0}^{M-1} w_m e^{-j\beta m\Delta x \cos \phi \sin \theta} = As(t) f(\theta, \phi) \quad (4.3)$$

El término  $f(\theta, \phi)$ , se llama el factor del arreglo, y determina la proporción de la señal de salida del arreglo  $z(t)$ , con respecto a la señal  $As(t)$  medida en el elemento de referencia.

La versatilidad de los sistemas de antenas inteligentes, radica en ajustar los valores del conjunto de ponderadores  $\{w_m\}$ , para obtener un señal de salida  $z(t)$  deseada. Es así, como se podría lograr que el patrón de radiación tenga su lóbulo principal en una dirección dada  $(\theta_o, \phi_o)$ , o que de igual manera el patrón tenga la forma y las características deseadas.

## 4.4. Clasificación de las antenas inteligentes.

### 4.4.1. Según la tecnología.

#### 4.4.1.1. Sistemas analógicos.

Como se mencionó en el apartado anterior, los sistemas de antenas inteligentes se constituyen de una serie de elementos de antenas, conectados a una red que controla la amplitud y la fase de cada elemento, para producir el patrón de radiación deseado. El más sencillo esquema para la obtención de los lóbulos del patrón, consiste en realizar un procesamiento analógico en la etapa de RF, empleando dispositivos para el corrimiento de fase y amplificadores; sin embargo, las altas exigencias de desempeño que requieren estos dispositivos, eleva de manera apreciable los costos y los hace prácticamente muy difíciles de implementar. Una solución alternativa, y que emplea igualmente tecnología analógica, consiste en realizar una conversión de la etapa de RF a una etapa de frecuencia intermedia, para realizar allí el procesamiento. Aunque desde el punto de vista práctico es mucho más sencillo de implementar, también posee ciertas desventajas. La primera es que se requiere un convertidor a frecuencia intermedia para cada elemento de antena, y segundo, se disminuye la relación de señal a ruido. Esto es debido al incremento de ruido inyectado por los dispositivos convertidores de frecuencia.

#### 4.4.1.2. Sistemas digitales.

El concepto de los sistemas digitales es similar al analógico, en el sentido que ambos ajustan la amplitud y la fase de las señales recibidas por cada elemento de antena, la diferencia está en el tipo de procesamiento. Al igual que los sistemas analógicos, la información puede ser tomada en la etapa de RF o en una etapa intermedia después de una conversión a frecuencia intermedia, para posteriormente ser convertida a señales digitales a través de un conversor analógico-digital. Las señales de banda base digital representan pues las amplitudes y fases de las señales recibidas en cada elemento de antena. Después de esto, se realiza la ponderación en amplitud y fase de las señales a través de procesamientos digitales.

Una de las ventajas más resaltantes de los sistemas digitales, es que no se requiere un ajuste tan preciso de la amplitud y la fase, como en efecto se necesita en los sistemas analógicos. Cualquier discrepancia en los pesos, fácilmente puede ser reajustado por el software encargado del control.

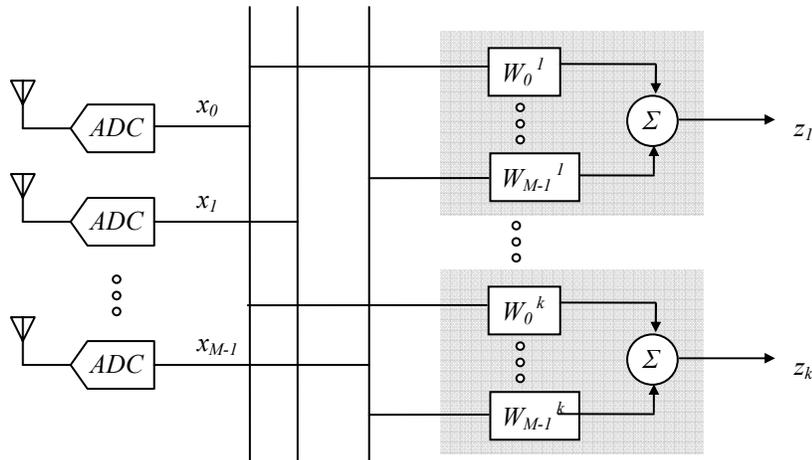
#### 4.4.2. Según la formación de lóbulos.

##### 4.4.2.1. Formación de lóbulos, elemento-espacio. (Del Inglés *Element-Space Beamforming*).

La formación de lóbulos discutido en el capítulo 4.2, se refiere a un proceso del tipo elemento-espacio, donde las señales provenientes de los diversos elementos de antenas  $x_m$ , con  $m=0,1,\dots,M-1$ , son directamente multiplicados por los ponderadores  $w_m$ , para formar un lóbulo en el ángulo deseado  $\theta_k$ . Al multiplicar las señales de entrada  $x_m$  por un grupo diferente de pesos  $w_m^k$ , donde  $m=0,1,\dots,M-1$  y  $k=1,2,\dots,K$ , es posible crear lóbulo que apunten a cualquier dirección  $\theta_k$ . La ecuación (4.4) es la expresión matemática correspondiente.

$$z(\theta_k) = \sum_{m=0}^{M-1} w_m^{k*} x_m \quad k=1,2,\dots,K \quad (4.4)$$

En la Figura 4.4 se muestra un sistema de formación de lóbulos, tipo elemento-espacio, constituido de  $M$  elementos de antenas, y capaz de producir  $K$  lóbulos independientes que pueden ser asignados por separados, a  $K$  móviles.



**Figura 4.4.** Esquema elemento-espacio

#### 4.4.2.2. Formación de lóbulos, lóbulo-espacio.(Del Inglés *Beam-Space Beamforming*).

A diferencia del método elemento-espacio, donde las señales de entrada de los elementos de antena son ponderados y sumados para producir la señal de salida deseada, en el esquema lóbulo-espacio, se construyen un grupo de lóbulos fijos, empleando una red pre-establecida, después la salida de cada lóbulo es ponderado y las señales resultantes son combinadas para producir la respuesta deseada. Las señales de los lóbulos que no son empleadas para crear la respuesta deseada, se pueden usar para cancelar interferencia.

#### 4.4.3. Según el ajuste del patrón de radiación.

##### 4.4.3.1. Conmutación de lóbulos fijos.

Este tipo de sistema de antenas inteligentes es muy sencillo de implementar. Requiere tan sólo de un generador de lóbulos pre-establecidos, y de un conmutador que se encarga de seleccionar cual es el mejor lóbulo para recibir la señal de cada móvil. El lóbulo del enlace de subida, también se emplea para transmitir la información del enlace de bajada. La selección de lóbulos se debe realizar para cada uno de los usuarios servidos por la estación base.

Los sistemas de conmutación de lóbulos, ofrecen varias de las ventajas de los sistemas más elaborados de antenas inteligentes, pero con una reducción en complejidad y costos. Existen sin embargo, algunas limitaciones. Primero, el sistema no es capaz de discernir las componentes de multi-trayecto, que llegan en direcciones cercanas a la componente directa. La segunda desventaja es que no se puede aprovechar la diversidad de caminos para hacer una combinación coherente de las señales multi-trayecto.

A pesar de las desventajas citadas anteriormente, los sistemas de conmutación de lóbulos, gozan de cierta popularidad entre los proveedores de servicios de telefonía celular. En primer término, porque se logra una extensión apreciable del rango de cobertura de las radio bases. Segundo, porque reduce en cierto grado la dispersión por retraso. Tercero, la interacción de los sistemas de antenas por conmutación de lóbulos con los equipos propios de la radio base, es moderada en comparación con los sistemas adaptativos, y por último, como ya se mencionó anteriormente, los costos son mucho menores con respecto a su similar, los sistemas adaptativos.

#### 4.4.3.2. Sistemas de arreglos adaptativos.

Un arreglo adaptativo de antenas, es aquel que ajusta en el transcurso del tiempo, los pesos de la ganancia y de la fase de cada ponderador, para que de una manera dinámica, se obtenga el patrón de radiación requerido por las condiciones de RF. Los ajustes que se realizan en el tiempo para optimizar el desempeño del sistema, pueden obedecer a diversos criterios. Por ejemplo, se puede incrementar la relación señal a ruido aumentando la señal recibida, o disminuyendo los niveles de interferencia.

En un sistema adaptativo, el vector de los pesos se ajusta con la finalidad de minimizar la función costo, que es la relación entre la salida del los arreglos ponderados y el valor deseado de dicha señal (Figura 4.5). Típicamente la función costo es inversamente proporcional a la calidad de la señal en la salida del arreglo, así cuando la función costo es mínima, la calidad de la salida del arreglo es máxima. Dos de las más populares técnicas que han sido utilizadas ampliamente en este tipo de sistema, son el error cuadrático medio mínimo, y los mínimos cuadrados. Para ambos casos, el cuadrado de la diferencia entre la salida del arreglo  $z(t) = w_k^H u_m(t)$  y  $d_k(t)$ , la estimación local de la señal deseada para los  $k$  usuarios, es minimizado para encontrar el vector de ponderación adecuado.

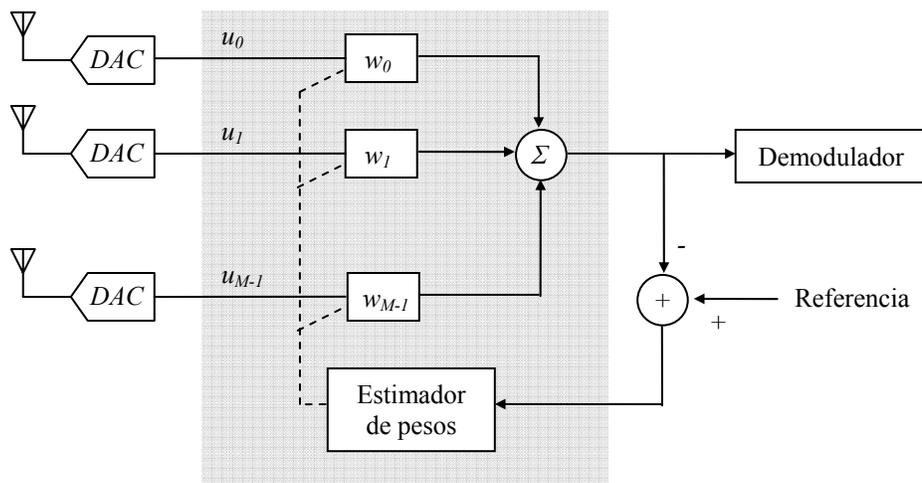


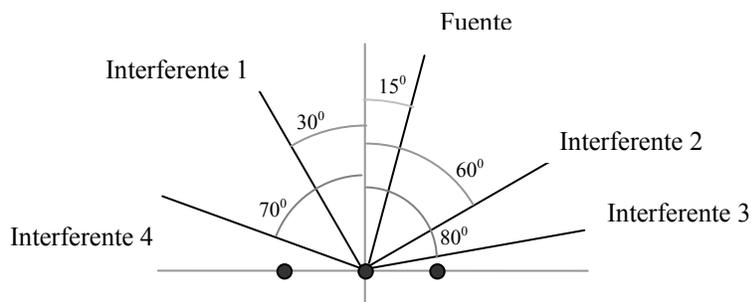
Figura 4.5. Estructura de un arreglo adoptivo.

En las técnicas de mínimos cuadrados y de error cuadrático medio mínimo, se requiere de antemano conocer o estimar la salida del arreglo, lo cual representa una limitación. Una manera que estos dos métodos emplean para contrarrestar dicha dificultad, es enviar periódicamente una secuencia de entrenamiento, conocida de antemano por el transmisor y el receptor. Un método alternativo a la secuencia de entrenamiento, consiste en variar la señal deseada  $d_k(t)$ , a través de un proceso de aprendizaje directo. Este técnica tiene el problema que al principio del proceso se pueden generar errores que degraden demasiado la calidad de la señal, por lo que generalmente se emplea una combinación de secuencia de entrenamiento con aprendizaje directo.

#### 4.5. Capacidad de ajuste de las antenas inteligentes

A continuación se presentará un investigación desarrollada por Hanzo y Blogh [2], quienes llevaron a cabo una simulación que tenía por finalidad, determinar la capacidad de rechazo a la interferencia, que posee un sistema de arreglo de antenas, constituido por 3 elementos uniformemente separados de manera lineal. También con el estudio se buscaba modelar el comportamiento del arreglo, una vez que el número de interferentes superaba a los grados de libertad del arreglo. Con este material se ilustrará como afecta la cantidad de elementos de antena del arreglo, en la capacidad de este ajuste del patrón de radiación del sistema.

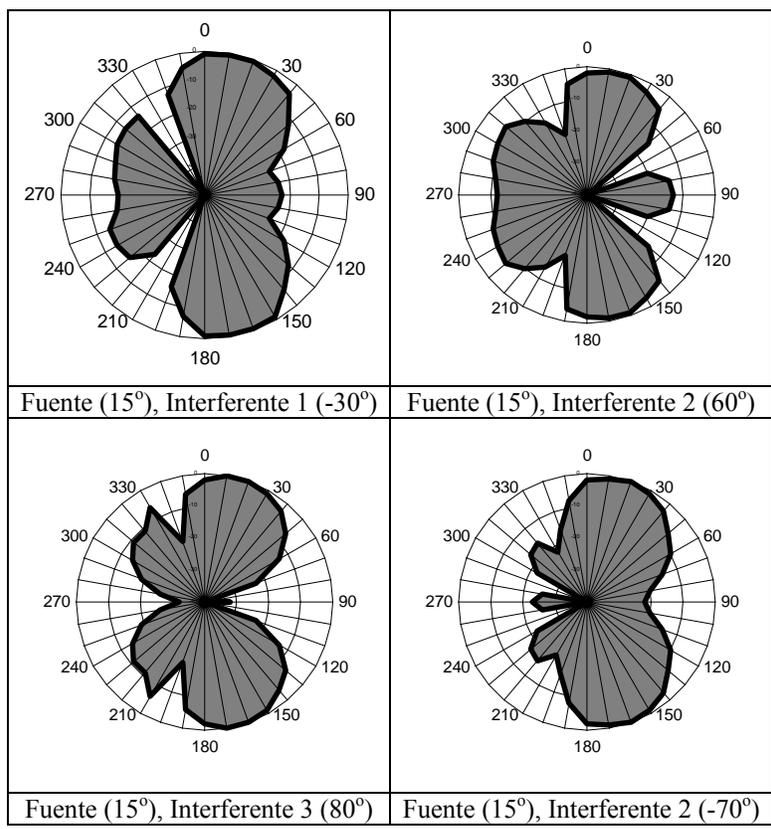
Se consideró una fuente y hasta cuatro interferentes, separados todos entre si, de manera azimutal. La fuente estaba orientada a  $15^\circ$ , y los interferentes a  $-30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $80^\circ$  y  $-70^\circ$  (Figura 4.6). Se asumió que tanto la fuente como los interferentes se encontraban en el campo lejano del arreglo, y que la propagación se realizaba sin multi-trayectos, con línea de vista directa.



**Figura 4.6.** Geometría del estudio de desempeño de un arreglo de 3 elementos, con una señal fuente y 4 interferentes.

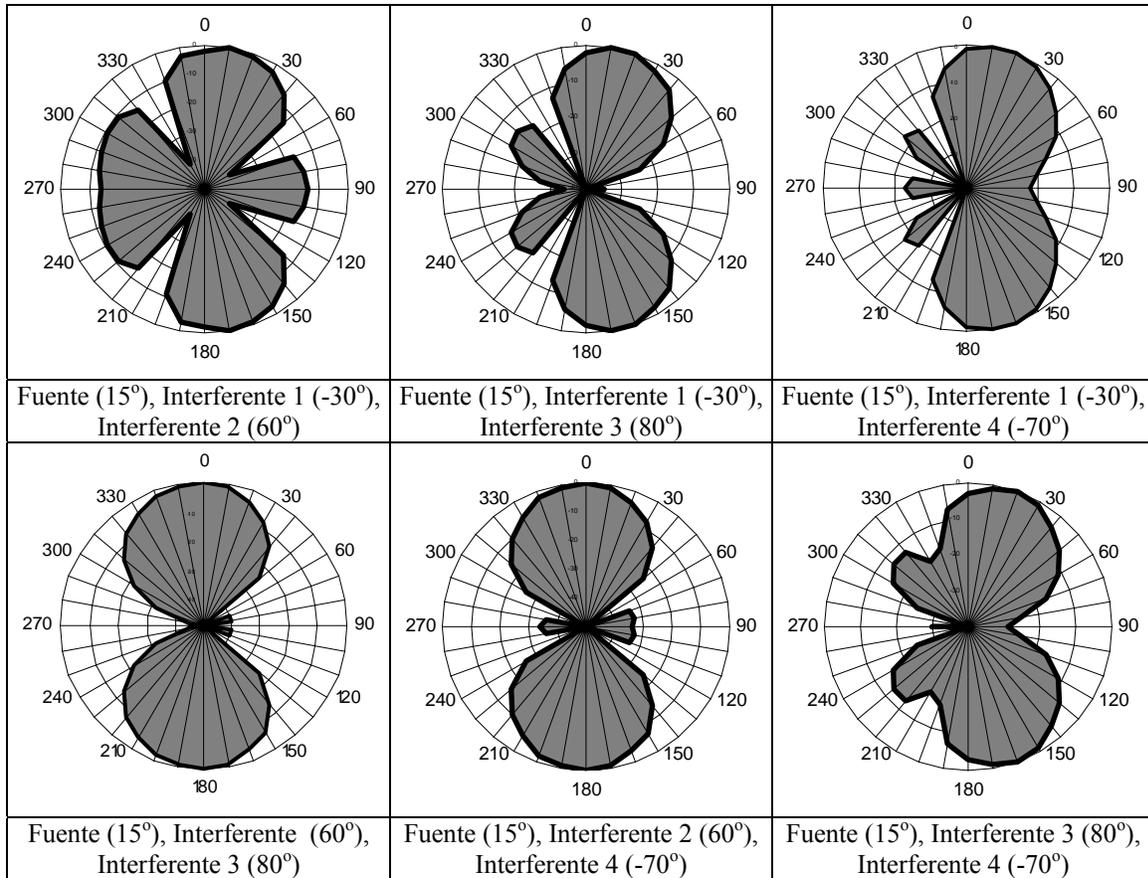
En primera instancia, se estudio el desempeño del arreglo de antenas, con la fuente y un solo interferente. Se realizaron las cuatro combinaciones, es decir, fuente con interferente 1, fuente con interferente 2, etc. Para los cuatro casos, se pudo constatar un excelente desempeño del patrón de radiación, donde se creaban nulos en la dirección de las señales de interferencia, con relación de rechazos superiores a los 40 dB. Igualmente la

respuesta era máxima, en la dirección de la fuente. En la Figura 4.7, se presenta los patrones obtenidos para 3 de los casos.



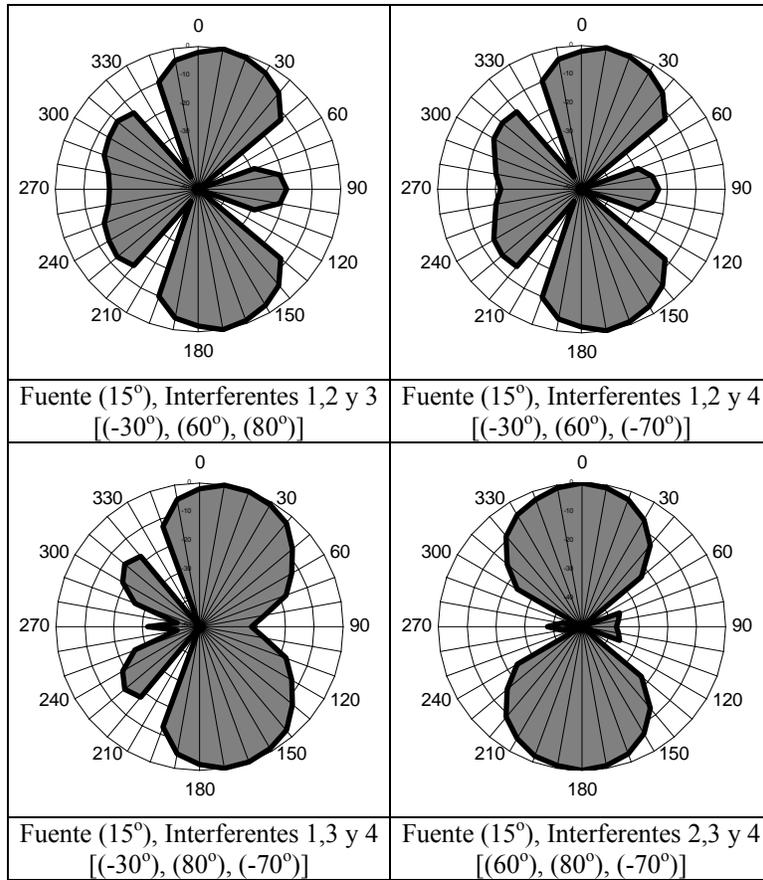
**Figura 4.7.** Patrones obtenidos con el arreglo de 3 elementos, para una fuente y un interferente.

Para la condición de dos señales interferentes, al menos 3 de los 6 casos estudios presentaron excelentes resultados, con máximo rechazo en la dirección interferente, y máxima respuesta hacia la fuente. Estos tres casos fueron con los pares interferentes: (-30°, 60°), (-30°, 80°) y (-30°, -70°). Para los casos (60°, 80°) y (60°, -70°), se seguía observado un marcado rechazo (superior a 40 dB) en la dirección de las interferentes, pero en la dirección de la fuente se observó una ligera caída de 3 dB en comparación con la respuesta máxima. Por último, en la combinación (80°, -70°), se observó una pequeña desmejora, al producir relaciones de rechazo de 25 dB en la dirección de las interferentes. Sin embargo, se puede concluir que todas las combinaciones ofrecieron respuestas bastante aceptables. (Figura 4.8).

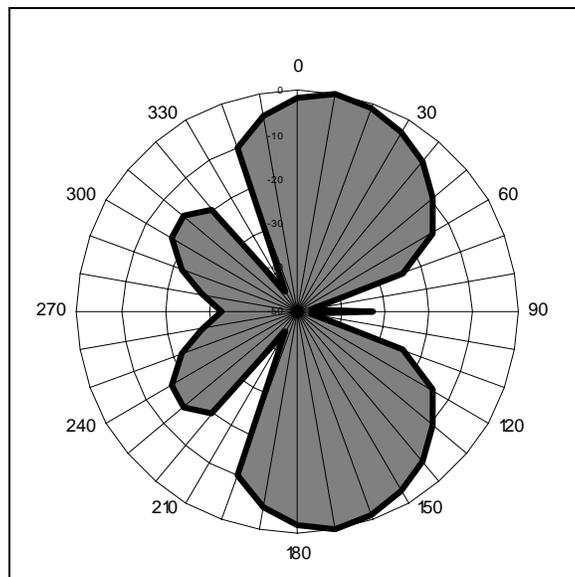


**Figura 4.8.** Patrones obtenidos con el arreglo de 3 elementos, para una fuente y dos interferentes.

Cuando tres señales de interferencia y una fuente inciden en un arreglo de antenas de tres elementos, el desempeño empeora en comparación con los casos en que inciden menos fuentes. En la Figura 4.9, se observa relaciones de rechazo de al menos 15 dB. En algunas ocasiones inclusive se midieron rechazos de 25 dB. Los resultados permiten concluir que existe una relación con la ubicación de las fuentes de la señal, pero en general se obtiene comportamientos aceptables.



**Figura 4.9.** Patrones obtenidos con el arreglo de 3 elementos, para una fuente y tres interferentes.



**Figura 4.10.** Patrones obtenidos con el arreglo de 3 elementos, para una fuente y cuatro interferentes.

Por último, se presenta en la Figura 4.10, el desempeño del sistema con los cuatro interferentes. El comportamiento sigue siendo aceptable, pero queda claro que a medida que se incrementa la cantidad de señales incidentes, disminuye la capacidad de respuesta del arreglo, para obtener patrones que permita diferenciar las señales.

En definitiva, se percibe del estudio que la cantidad de elementos fuentes o interferentes que tiene que discriminar el sistema de antenas inteligentes, está fuertemente ligado a la cantidad de elementos de antenas que constituyen el arreglo, por lo tanto, para una mayor cantidad de elementos radiantes, mayor capacidad de ajuste en el patrón de radiación. En este sentido los diseñadores de este tipo de sistemas, tienen que buscar el equilibrio que les permita obtener una buena capacidad de ajuste en el patrón, pero que al mismo tiempo no complique la electrónica y los algoritmos de procesamiento.

#### **4.6. Diversidad y sectorización con antenas inteligentes.**

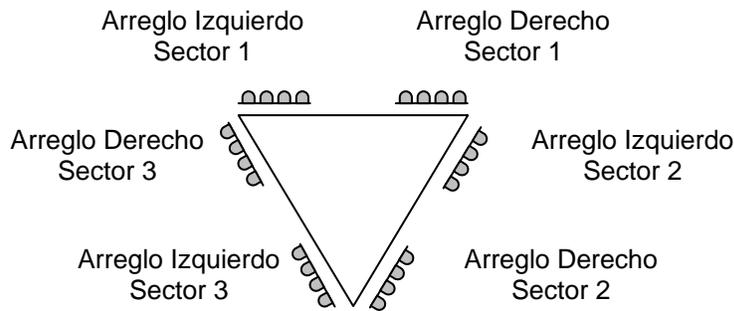
Los multi-trayectos en un canal de radio, pueden generar el desvanecimiento de la señal recibida, en particular cuando el ancho de banda de la señal, es pequeño en comparación con el ancho de banda del canal. Esto constituye un problema que tradicionalmente, ha sido contrarrestado con la implementación de diversidad espacial en la recepción, solución que ha demostrado ser económica y efectiva.

Los arreglos adaptativos de antenas, en ciertas circunstancias, poseen la habilidad de combinar de manera coherente los multi-trayectos, disminuyendo los desvanecimientos. Sin embargo, cuando la cantidad de interferentes es considerable, o el número de multi-trayectos es grande, o cuando la separación angular de los componentes de los diversos caminos es pequeña, o cuando el piso de ruido es elevado, la capacidad de las antenas inteligentes de reducir el desvanecimiento, disminuye.

Un mecanismo alternativo para atacar el desvanecimiento, y que emplea arreglos adaptativos y diversidad espacial, se muestra en la Figura 4.11. El sistema posee dos arreglos adaptativos, que realizan de manera independiente la formación del patrón de radiación. Al final, el sistema selector de diversidad, se encargará de escoger la salida del arreglo que tenga la mejor calidad de señal. Una desventaja inmediata que se desprende de este sistema, es la cantidad de recursos requeridos, aspecto que eleva de manera apreciable los costos.

Aparte de la diversidad espacial, otra de las técnicas extensamente usada en los sistemas de telefonía celular es la sectorización, que consiste en dividir una celda en varias regiones angulares. Típicamente cada celda se fracciona en 3 sectores, cada uno con un rango de  $120^\circ$ . La sectorización permite re-usar los recursos espectrales más frecuentemente, aumentando la capacidad de manejo de las radio bases. En el caso particular de los sistemas TDMA, la sectorización disminuye la eficiencia de los troncales, debido a que hay que dividir los canales entre los sectores, pero se logra un aumento en la capacidad del sistema, al aumentar el re-uso de frecuencia. Para el caso de CDMA la





**Figura 4.12.** Vista superior de una implementación con diversidad, sectorización y antenas inteligentes.

## 4.7. Antenas inteligentes en el enlace de bajada.

En los sistemas de telefonía celular, la calidad de la señal recibida por el móvil, puede ser mejorada mediante ajustes en el modo de transmisión desde la radio base. Se obtendrían resultados más beneficiosos, si simplemente se pudiese transmitir en aquellas direcciones que contribuyesen en la reconstrucción de la señal deseada en el lado de la recepción, evitando irradiar en las direcciones que generarían interferencia a los otros suscriptores. Se puede decir por lo tanto, que el objetivo de las antenas inteligentes para el enlace de bajada, es crear un patrón de radiación, que provea la calidad de la señal adecuada, mientras se minimiza la interferencia a los demás usuarios.

Son varios los aspectos que complican la formación de patrones de radiación en el enlace de bajada, destacando en mayor medida la propagación multi-trayecto. En los casos que se tiene perfecto conocimiento de los modos de propagación del canal, se puede aprovechar la diversidad, para transmitir varias señales fuertes a través de varios caminos, y suprimir los trayectos que no llegarán al destino. Se sabe que en la práctica es imposible tener un exacto conocimiento del modo de propagación, además de la variación en el tiempo que sufre el mismo, por lo que el objetivo del ajuste de patrón en bajada se debe enfocar en seleccionar la mejor dirección de transmisión, y ser capaz de rápidamente ajustar el trayecto cuando el abonado se desplaza de sitio.

Cuando se realiza ajustes de patrones en el enlace descendente, con el fin de mejorar calidad y no de ampliar el alcance de la celda, es necesario controlar la potencia isotrópica irradiada, de tal manera que cuando se incremente la ganancia en una dirección particular, se disminuya convenientemente la potencia de transmisión. De no realizarse este control, al aumentar la ganancia en un sentido, se estaría empeorando la relación de portadora a interferencia de los usuarios cercanos a la radio base.

El esquema más sencillo de implementación para la formación de patrones en bajada, consiste en crear el mismo patrón de radiación calculado para el enlace ascendente. Dado que en los sistemas de telefonía empleados en Venezuela, la transmisión y la recepción emplean frecuencias diferentes, hace que no exista una buena correlación entre

ambos canales, debido a que para un mismo trayecto de bajada y subida, las fases de la señales van a ser diferentes. Es por esta razón que este mecanismo no es el más apropiado para la creación de patrones de bajada.

Un segundo grupo de técnicas emplea mecanismos de búsqueda de la dirección de llegada de las señales, para la formación del patrón en el sentido descendente. En este sentido, si se localiza un camino directo de transmisión, donde la intensidad de la señal es fuerte, es razonable crear un lóbulo de radiación en dicha dirección. Este tipo de implementación también puede ser soportada con cálculo de los retrasos de la señales, lo que permite determinar cuales son los caminos directos de la señal. En general, la técnica de búsqueda de direcciones de transmisión, emplea algoritmos muy complejos de procesamiento de señales.

Un último mecanismo emplea una realimentación de las señales recibidas por el móvil, con el fin de calcular las ponderaciones a emplear en el arreglo de antenas. El proceso consiste en transmitir unas señales de prueba en el canal descendente, para que cada uno de los receptores pueda medir la respuesta de cada señal. Dichos valores son transmitidos en el sentido ascendente, y finalmente, el sistema calcula la respuesta de los canales de transmisión. Esta técnica en particular tiene los inconvenientes que el proceso se puede desmejorar por la propagación de ida y vuelta y los retrasos asociados, y segundo que requiere de alteraciones de los actuales estándares de la interfaz de aire.

#### **4.8. Proveedores actuales de antenas inteligentes.**

Los sistemas de antenas inteligentes que se encuentran en el mercado, se pueden clasificar en dos grupos: el primero, los llamados “*applied smart antenna systems*”, o sistemas superpuesto de antenas inteligentes. Están constituidos por equipos que se integran entre la radio base y el sistema radiante, y se encargan de realizar las funciones de control para llevar a cabo los ajustes de los patrones de radiación de los sectores. La segunda tendencia, se conoce como “*embedded smart antenna*” o sistema alojado de antenas inteligentes. En este caso, la solución es proporcionada por los mismos proveedores de radio bases, quienes incluyen las funcionalidades de las antenas inteligentes en las tarjetas de radio de sus equipos, y así los ajustes adaptativos de los patrones se realizan en la propia radio base, sin la necesidad de tener que incluir ningún otro equipo de control externo a la radio base.

Los sistemas tipo superpuestos, requiere una fuerte interacción entre los proveedores de las antenas inteligentes y los proveedores de la radio bases, ya que ambos equipos deben ser integrados para permitir el correcto funcionamiento de los sistemas celulares. En este sentido, la tecnología GSM brinda mayor flexibilidad a los proveedores de sistemas tipo superpuesto, debido al alto grado de estandarización que presenta el sistema de telefonía europeo, en cuanto a la inter-conectividad de equipos de diversas marcas. Por esta razón, se consigue en el mercado una cantidad importante de proveedores de sistemas superpuestos de antenas inteligentes para la tecnología GSM (En Tabla 4.1, se muestran 2 de los proveedores de sistemas superpuesto, y con las características resaltantes

de los productos que ofrecen). Los proveedores pertenecen al sector de medianas empresas, que gracias a la inter-conectividad abierta de los sistemas GSM, han encontrado sus espacios para el desarrollo de la tecnología de antenas inteligentes.

<b>Proveedor</b>	<b>Modelo</b>	<b>Características</b>
ArrayComm, Inc.	IntelliCell	Soporta redes GSM, PHS y WLL. Sistema adaptativo que permite ajuste de patrón en el sentido ascendente y descendente. Require equipos externos a la radio base.
Marconi Mobile Access S.p.A	Sin nombre	Soporta unicamente redes GSM. Emplea arreglos de antenas de 4 elementos. Poseen sistemas adaptativos y de conmutación de lóbulos.

**Tabla 4.1.** Productos de sistemas superpuestos de antenas inteligentes.

#### **4.8.1. Sistemas superpuestos de antenas inteligentes para CDMA.**

Existieron varias compañías que trataron de desarrollar sistemas superpuestos de antenas inteligentes para la tecnología CDMA. Todas ellas se encontraron con la dificultad que debían adaptar las características de sus equipos, para cada uno de los proveedores de radio bases. En CDMA a diferencia de GSM, la inter-conectividad entre diversos proveedores y diversos equipos no está bien establecida, por lo que lograr que los equipos funcionaran con cada proveedor de radio base, implicaba inversiones de desarrollo muy elevadas. Esto al final trasladaba todo esos costos al producto final, lo cual elevaba apreciablemente el precio de los equipos.

Una de las primeras empresas en desarrollar este tipo de sistemas, fue la compañía americana Metawave Communications Corporation. Para el año 2001 tenían en el mercado su producto “Spotlight 2200”. Entre las características más importantes que ofrecía el producto están:

- Compatibilidad con la radio bases de Lucent Technologies, Motorola y Nortel Networks.
- Tecnología para la síntesis de sectores: individualiza la configuración de los sectores, para balacear la carga de tráfico.
- Permite la configuración de radio bases de 4,5 y hasta 6 sectores, para obtener ganancias de capacidad de hasta 80%.
- Síntesis dinámica de sectores: permite ajustar los sectores con respecto a las variaciones temporales de tráfico.
- El sistema incluye no sólo la parte de control, sino también los paneles con los arreglos de antenas.

A pesar de las ventajas que ofrecía el sistema, los precios de los equipos eran muy elevados, y no despertó mayor interés en los proveedores de servicios móviles CDMA, lo que finalmente obligó a la compañía a declararse en banca rota a comienzos del año 2003.

#### **4.8.2. Sistemas alojados de antenas inteligentes para CDMA.**

Entre los proveedores que ofrecen radio bases para la tecnología CDMA y que además han desarrollado sistemas alojados de antenas inteligentes, se encuentra: Lucent Technologies, Nortel Networks y Motorola.

Toda la plataforma tecnológica CDMA de Movilnet es marca Lucent Technologies, por lo que en primera instancia, la opción más viable de implementación de antenas inteligentes en Movilnet será a través del sistema alojado de Lucent. Considerar los otros proveedores implicaría integrar las radio bases Motorola y/o Nortel al sistema Lucent. Esto trae una serie de complicaciones que van más allá de los beneficios que podría proporcionar las antenas inteligentes.

A continuación se presenta un compendio de las características de los sistemas de los proveedores Lucent, Nortel y Motorola. Se realizará un mayor énfasis en el sistema de Lucent por ser el proveedor tecnológico de Movilnet para la red CDMA.

##### **4.8.2.1. Antenas inteligentes de Lucent Technologies.**

El sistema alojado de antenas inteligentes ofrecido por Lucent Technologies, mejora la capacidad y cobertura del sistema en un 40%, según las estimaciones calculadas por los científicos de esa empresa. Las características más importantes del sistema son:

- Emplea un arreglo de 4 antenas, agrupadas en pares. La separación entre las antenas del mismo par debe ser de  $\frac{1}{2} \lambda$ , y entre los pares de  $10\lambda$ .
- Las señales de las cuatro ramas se emplean para realizar un proceso adaptativo en el sentido ascendente, basado en estimaciones de mínimos cuadrados.
- Con la información del ángulo de llegada del sentido ascendente, se generan los patrones en el sentido ascendente.
- Todos los elementos de hardware necesarios para realizar el control del sistema, están incluidos dentro de la radio base. No se requiere ningún equipo externo.

##### **4.8.2.1.1. Consideraciones de Hardware y de software, para la implementación de las antenas inteligentes de Lucent.**

El modelo de radio bases CDMA, llamada MODCELL 4.0, es el único de los modelos de Lucent Technologies que soporta sistemas de antenas inteligentes. Adicionalmente se debe cumplir los siguientes requerimientos:

- Poseer versión de software # 23 (En inglés se conoce comúnmente como *Release 23*). Esta versión fue puesta en el mercado en Septiembre del 2004.

- Requiere una tarjeta de canales especial, modelo CMU IV.

- Si el sistema está constituido por más de 3 portadoras, se requiere un radio especial modelo MCR para soportar las antenas inteligentes. En caso de no tener más de 3 portadoras, se emplea el radio modelo UCR.

- La tarjeta de pruebas y diagnósticos o TDU (del inglés, *Test and Diagnostic Unit*) debe ser reemplazada por la tarjeta modelo IA-TDU.

#### **4.8.2.1.2. Situación actual del sistema Lucent de Movilnet.**

La primera limitante que posee Movilnet para la instalación de antenas inteligentes de Lucent, es que posee la versión de software número 21. Se debe en primera instancia actualizar a la versión 22, para después llegar a la 23.

Movilnet posee actualmente dos tipos de radio base Lucent, la MODCELL 4.0, y las CDBS. La primera de ellas es la única que soporta antenas inteligentes, por lo tanto, si las estaciones que requieren antenas inteligentes poseen en la actualidad equipos modelo CDBS, en primer lugar se debe reemplazar dicho modelo por el MODCELL 4.0.

Las radio bases modelo MODCELL 4.0 que posee Movilnet no tiene ninguno de los equipos especiales para la instalación de antenas inteligentes, estas son tarjeta de canales CMU IV y tarjeta IA-TDU. Con respecto al radio, dado que aún se dispone de una sola portadora, no requiere ser sustituido.

Por último, una buena parte del sistema radiante de Movilnet, emplea diversidad de polarización, por lo que los sectores tan solo poseen 1 antena. Esto ocurre principalmente en las estaciones que dan cobertura a las grandes ciudades. Debido a esto, se requiere instalar 3 nuevas antenas para formar el arreglo de 4 antenas que requiere el sistema de Lucent. De igual manera, esto probablemente también implique una adecuación en los mástiles, monopolos y torres, para poder soportar el arreglo de antenas.

#### **4.8.2.2. AABS de Nortel Networks.**

El producto AABS de Nortel, proviene del inglés Adaptive Antenna Beam Selection o Selector de rayos con antenas adaptativas. Entre las características más importantes están:

- El sistema incluye el arreglo de antenas (Diseño propietario de Nortel), constituido por 6 columnas de 8 elementos cada uno. El arreglo reemplazaría la configuración estándar de dos antenas por sector. El panel mide aproximadamente 2 m de alto por 1,1 de ancho

- El sistema permite la formación de 3 lóbulos de 22 grados de apertura, para cada sector de la radio base. Los canales de control (piloto, voiceo y sincronía) se transmiten por igual para los 3 lóbulos.

- La implementación del sistema AABS en las radio bases Nortel, no requiere cambios en el hardware de radio y de control, tan solo requiere actualizaciones de software.

#### **4.8.2.3. Antenas Inteligentes de Motorola.**

La compañía Motorola también ofrece un sistema de antenas inteligentes, embebidos en su propia radio base. Los aspectos resaltantes de este sistema son:

- Emplea sistemas de conmutación de lóbulos, empleando arreglos de antenas de 4 elementos.
- Se genera un lóbulo aparte para los canales de control (piloto, sincronía y voiceo), que da cobertura a la región abarcada por los diferentes lóbulos.
- Utiliza una red pasiva para generar la generación de los lóbulos.

## **5. ANTENAS INTELIGENTES Y CDMA**

### **5.1. Introducción.**

En este capítulo, se presenta un análisis de los posibles impactos que ocasionaría la implementación de antenas inteligentes, en los procesos de llamada de los sistemas CDMA. Se tomará en cuenta el acceso al sistema, el establecimiento de llamada, los relevos y los controles de potencia. También se analizará la interacción de las antenas inteligentes con los procesos de llamadas para datos, tomando en consideración los aspectos que impactan la transmisión a alta velocidad.

### **5.2. Impacto de las antenas inteligentes en el enlace de subida.**

#### **5.2.1. Acceso al sistema.**

Como se discutió en el capítulo 3, Sistemas CDMA 3G1X, el acceso al sistema por parte del móvil, se produce cuando este genera una llamada, cuando responde a un voice, o cuando envía un mensaje de registro. Para los tres casos, el móvil transmitirá con una cierta potencia, que irá incrementándola de manera secuencial hasta que logre ser captada por la radio base.

En los sistemas de telefonía celular donde no se ha implementado las antenas inteligentes, un móvil llevará a cabo satisfactoriamente el proceso de acceso, si se encuentra dentro del área de cobertura de la radio base. Para el caso de los sistemas con antenas inteligentes, el patrón de radiación se ajusta dinámicamente según la demanda de tráfico y la ubicación de los móviles y sus interferentes. En un momento dado, puede ocurrir que se haya creado un lóbulo nulo precisamente en la dirección donde se encuentra el móvil que requiere tener acceso al sistema. Para esta condición, probablemente se llevarán a cabo todas las secuencias de acceso, y no se culminará con éxito el proceso de acceso.

Bajo el panorama descrito anteriormente, la probabilidad de acceso satisfactorio al sistema, va a depender de la condición instantánea del patrón de radiación de las antenas inteligentes, por lo que la versatilidad de ajuste de patrón favorece a un mejor empleo del recurso radioeléctrico, pero puede ocasionar fallas al momento del acceso.

El impacto negativo sobre los intentos de acceso, se hace más evidente cuando la cantidad de usuarios servidos por el sector es pequeña, o cuando se emplea un mayor número de elementos de antenas para el arreglo. En el primer caso, el bajo número de usuarios aumenta las probabilidades que el móvil que intenta tener acceso, se encuentre fuera de las áreas de cobertura de los lóbulos del patrón; y el aumento del número de elementos de antena permite la creación de lóbulos más directivos, disminuyendo igualmente las posibilidades de ser atendido.

Una posible solución a la problemática planteada, consistiría en destinar una antena para dar acceso a los móviles. El patrón de radiación de dicha antena, delimitaría el área de cobertura de dicho sector. Después se podría utilizar el arreglo de antenas inteligentes, para captar las señales de los canales de tráfico.

En la documentación científica no se ha encontrado mayor referencia al problema de acceso con las antenas inteligentes, a pesar inclusive, que dicho inconveniente se presenta de igual manera en los sistemas analógicos y TDMA.

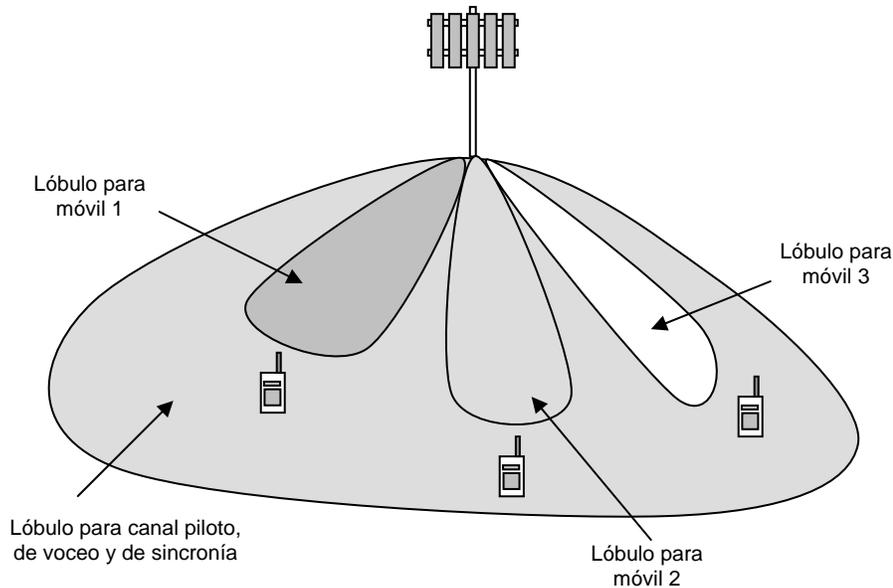
### **5.3. Impacto de las antenas inteligentes en el enlace de bajada.**

#### **5.3.1. Manejo del canal piloto.**

Según lo discutido en el capítulo 3, los canales piloto, de sincronía y de voceo del enlace de bajada, deben ser suministrados de manera continua en el área cubierta por la radio base. De no ocurrir esto, los usuarios no podrán detectar servicio en dichas áreas. El problema presentado es similar al discutido en 5.2.1, donde debido al ajuste de los patrones de radiación se corría el riesgo de no permitir el acceso al sistema.

Una implementación sencilla que parecería resolver el problema antes descrito, consiste en emplear un lóbulo ancho para transmitir las señales piloto, de sincronía y de voceo, y lóbulos pequeños para enfocar la energía de los canales de tráfico en la dirección donde se encuentra usuarios. El esquema planteado, se muestra en la Figura 5.1.

La solución planteada tiene una implicación negativa. Según el estándar de CDMA, la demodulación del canal de tráfico en el enlace descendente, se realiza de manera coherente con respecto al canal piloto, por lo que es importante que ambas señales no tengan variaciones de fase. Cuando los canales de tráfico y el piloto son transmitidos con lóbulos de diferentes anchos, las características de los canales de radio varían. Como el canal piloto se transmite con un lóbulo de mayor apertura, es muy probable que consiga más objetos difusores o reflectores en comparación con el canal de tráfico. Además de esto, también es posible que exista diferencia de fase entre los patrones de las dos antenas de transmisión. Ambos aspectos generan distorsiones en la relación de la fase del canal de tráfico con respecto al piloto.



**Figura 5.1.** Esquema que emplea por separado los canales de tráfico, de los canales pilotos, de sincronía y de voiceo.

En el estándar CDMA 3G1X, se incorpora los canales pilotos auxiliares, aspecto que podría ayudar a solventar dicho problema. Estos pueden ser implementados de diversas maneras. Por ejemplo, en un área de alta densidad de tráfico, se puede destinar un lóbulo fijo para dar cobertura a dicha zona, y asignar un canal piloto auxiliar. También los canales auxiliares pilotos se pueden destinar para un grupo de usuarios, o inclusive para un usuario solo, por separado.

Es importante señalar, que si bien el empleo de los canales auxiliares puede solucionar el problema descrito en esta sección, esto trae a su vez una serie de dificultades. Primero, al permitir varios PNs por sector, hace mucho más difícil el proceso de asignación de estos. Segundo, se alargaría el tiempo de procesamiento que el móvil requiere para decodificar los PNs, ya que se dispondría de un número mayor de estos, impactando al mismo tiempo los tiempos para el establecimiento de los relevos.

#### **5.4. Impacto de las antenas inteligentes al proceso de relevo.**

La interacción de los pilotos dentro de las listas de relevo, depende directamente de los niveles de  $E_c/I_o$  de cada uno de ellos, o en otras palabras, de la relación de intensidad con que se capta a las señales de los pilotos, con respecto al nivel de interferencia presente en la zona. Para un mejor entendimiento del impacto de los patrones ajustables en el proceso de relavo, se analizará por separado los dos términos de la relación  $E_c/I_o$ .

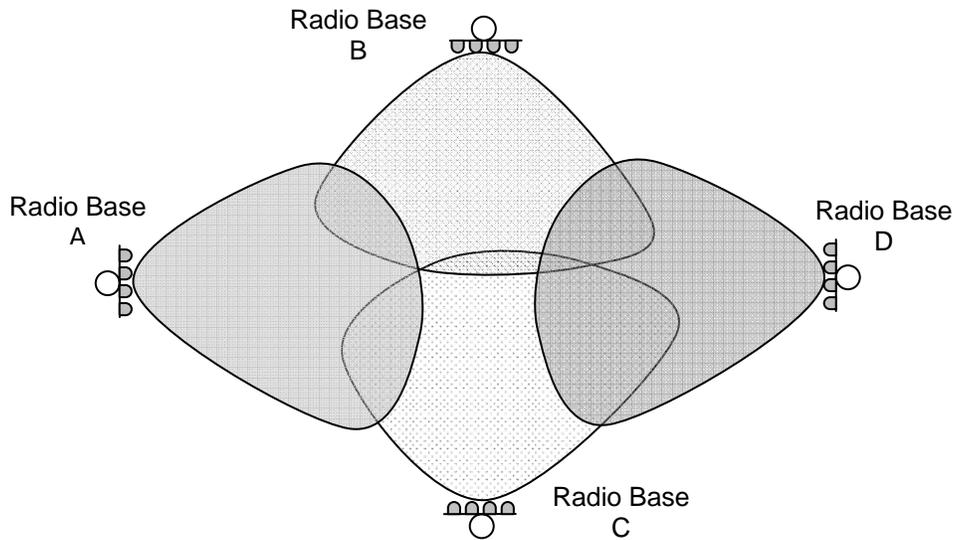
### 5.4.1. Intensidad de los canales pilotos.

El ajuste del patrón de radiación en el enlace de bajada, podría lograr que la energía de los canales pilotos, sea captado con mayor intensidad, cuando se orienta los lóbulos de máxima ganancia hacia los móviles. En cuanto al numerador de la ecuación, la interferencia, también se obtendrán ventajas con los sistemas de antenas inteligentes con ajuste en el enlace de bajada. Como las señales de los canales de tráfico y pilotos se transmiten de manera directiva, la interferencia se verá disminuida en un porcentaje importante.

Por lo tanto, se estaría aumentando el valor de la relación  $Ec/I_0$  gracias a la contribución del numerador y del denominador, esto considerando que el sector que maneja la radio base conoce de antemano cual es la dirección del lóbulo que debe transmitir el piloto que maneja la llamada en curso. Ahora bien, en el proceso de relevo también intervienen las vecinas, por lo que también es importante que las señales de dichos pilotos no sean cancelados en la dirección del móvil, para que también puedan interactuar con las listas de relevos. Se vislumbra pues, la necesidad de tener un algoritmo que determine con precisión cuando se debe iniciar el proceso de ajuste del patrón en el sentido descendente. Este aspecto de nuevo redundará en mayores complicaciones en procesamientos y algoritmos para el sistema de control.

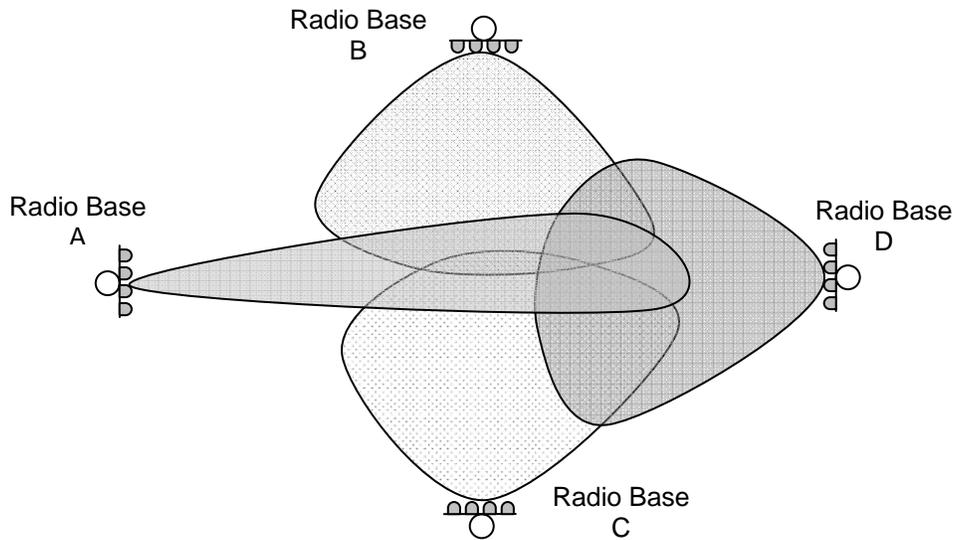
### 5.4.2. Lista de pilotos vecinos.

Para que una radio base sea incluida en la lista de pilotos activos, debe cumplir dos aspectos primordiales: que el móvil mida con suficiente intensidad el  $Ec/I_0$  del canal piloto, y que este incluida en la lista de vecinas de las radio bases que están manejando la llamada. En términos prácticos, considere que la radio base  $A$  y la radio base  $B$  forman parte de la lista de activos que manejan la llamada del móvil. Para que el piloto  $C$  inicie un proceso de relevo para participar de la lista de activos, debe estar incluida en la lista de vecinas definidas tanto para la radio base  $A$  y  $B$ . Como se puede entender del ejemplo, el proceso de creación, depuración y mantenimiento de la listas de vecinas de las radio bases es una tarea importante que debe llevar a cabo el ingeniero de RF, para garantizar que los procesos de relevo se lleven a cabo de la manera adecuada y en el momento adecuado, evitando además las llamadas caídas.



**Figura 5.2.** Interacción de varias radio bases en el proceso de relevo.

Para comprender el impacto que podría tener las antenas inteligentes en el proceso de relevo y en la interacción de las radio bases debido a sus listas de vecinas, considere el caso que se plantea en la Figura 5.2. Allí se observa las zonas de cobertura de 4 radio bases. Según las áreas de solapamiento, la radio base *A* tan solo interactúa con la radio base *B* y *C*, por lo tanto estas dos radio bases deberían estar en la lista de vecinas de la celda *A*. Si ahora, debido a unas condiciones de tráfico puntuales, el patrón de radiación de la antena del sector *A* se ajusta de la manera que se muestra en la Figura 5.3, considerando que esta tiene antenas inteligentes, la interacción de la radio base *A*, ya no será solo con las radio bases *B* y *C*, sino también con la radio base *D*. Como se puede observar, una radio base con antenas inteligentes va a interactuar con muchas más radio bases comparado con el caso de las radio bases sin antenas inteligentes, debido a la ampliación del radio de cobertura y de los ajustes en la ganancia en los patrones de radiación.



**Figura 5.3.** Interacción de radio bases con antenas inteligentes, en el proceso de relevo.

El número de radio bases que actualmente se pueden definir en la lista de vecinas es 20. En zonas rurales donde la densidad es baja, dicha cantidad es suficiente para definir la interacción entre las vecinas. Sin embargo, en zonas urbanas como las grandes ciudades, donde es necesario para garantizar la correcta cobertura, tener una alta densidad de radio bases, en ocasiones, la capacidad de la lista de vecinas se vuelve insuficiente. En la práctica, cuando la lista de vecinas ya tiene definida a 20 radio bases, y se requiere agregar algunas otras más, se recurre a un análisis estadístico donde se compara las radio bases según la cantidad de relevos que realiza, para así descartar las que menos interacción tienen, y causar el menor impacto posible a los usuarios.

Como se analizó en el ejemplo de la Figura 5.2 y de la Figura 5.3, la implementación de antenas inteligentes puede incrementar el número de interacciones con otras estaciones. En zonas rurales, donde la densidad de radio bases no es alta, pudiera no tener mayor impacto, sin embargo, en ambientes urbanos, donde el número de estaciones por área cuadrada es elevado, es posible que se observe desmejoras en el desempeño del sistema. El parámetro que posiblemente se vea afectado, es el número de llamadas caídas. Al aumentar las interacciones de las radio bases, y al ser el número de registro de la lista de vecinas limitado, va a ocasionar que mucha de las interacciones de las radio bases no sean consideradas por el sistema, y ocasione la caída de la llamada cuando se vaya degradando la señal.

Suponga por un instante que no existe límite en la lista de vecinos, y que se pueden incluir todas las necesarias. Si la lista pasa por ejemplo, de 20 a 30 radio bases, la cantidad de mediciones de celdas vecinas que necesita realizar el móvil va a ser mayor. Esto implica que este va a ser mucho más lento para detectar cuando uno de los canales pilotos de las vecinas incrementa su intensidad. En definitiva, aumentar el número de pilotos de la lista de vecinas aumenta los periodos de mediciones, por lo que también los procesos de relevos se hacen lentos. Bajo estas condiciones, también es probable que se observe un incremento en

el número de llamadas caídas. Tratar de impulsar una modificación en el estándar en cuanto al número de vecinas que pueda tener una radio base, no parece mejorar el inconveniente que genera el aumento de la cobertura debido a las antenas inteligentes.

## **5.5. Impacto de las antenas inteligentes en los controles de potencia.**

La administración de la potencia tanto en la radio base como en el móvil parecen ser uno de los puntos más beneficiados por las antenas inteligentes. Cuando se ajusta los patrones de radiación tanto en el sentido descendente como en el ascendente para tener la máxima ganancia en la dirección del móvil, permite la reducción de la potencia de transmisión necesaria en ambos sentidos. Es aquí cuando deben entrar los controles de potencia para facilitar el ajuste de la misma.

Es importante recordar que las antenas inteligentes realizan procesamientos digitales de las señales, por lo que el ajuste de los patrones de radiación, tienen un cierto tiempo de respuesta. De igual manera los controles de potencia en el ascendente y en el descendente, se realizan en ciclos que poseen cierta periodicidad. De no existir una adecuada sincronización de los procesos de ajuste del patrón de radiación por parte de las antenas inteligentes, y de ajuste de la potencia por parte del sistema, se podría estar transmitiendo con más potencia de la necesaria.

## **5.6. Transmisión de datos a alta velocidad**

Los sistemas de telefonía móvil de tercera generación, y en particular CDMA 3G1X, permiten realizar, además de las simples llamadas de voz, transmisiones de datos a alta velocidad. Esto es un importante paso que amplía el conjunto de servicios, que el operador puede brindar a sus suscriptores.

La transmisión de datos en CDMA es sensible de los niveles de señal medidos por el móvil. Bajo esta premisa, las antenas inteligentes podrían facilitar las condiciones de RF para permitir un mejor desempeño en la transmisión de datos.

## **5.7. Condiciones de RF para la transmisión de datos.**

Debido a la naturaleza digital de la información que viaja a través del aire en los sistemas CDMA, se debe cumplir una serie de requisitos en cuanto a la calidad de la señal, para garantizar la correcta demodulación de la señal en el receptor. Como en la mayoría de los sistemas digitales, se emplea la figura de relación de señal a ruido, que para el caso particular de CDMA, se considera la relación de energía de bit con respecto a la densidad de potencia de ruido  $E_b/N_0$ . Es importante señalar que en la potencia de ruido están incluidas todas las señales interferentes, por lo que si se está considerando un móvil en

particular, la potencia que se transmite en la señal de los otros móviles, estará incluida en la variable  $N_o$ .

Tanto en la transmisión de voz como en la de datos, el enlace debe cumplir un valor mínimo de  $E_b/N_o$ , para permitir una tasa aceptable de errores en la decodificación de las tramas de información. Para los sistemas IS-95 el valor mínimo de  $E_b/N_o$  es 7 dB, y para los sistemas 3G1X, gracias a unas modificaciones que se incluyeron en los procesos de codificación-decodificación, se disminuyó el valor a 4 dB.

La energía de bit se obtiene al dividir la potencia de la señal  $P_m$ , entre la tasa de transmisión de la señal  $R$ , donde el resultado obtenido tendrá unidades de energía por bit. Por otra parte, la densidad de potencia de ruido, se calcula al dividir la potencia total de ruido  $I_{tot}$  entre el ancho de banda de la portadora CDMA  $W$ , como se muestra en la ecuación (5.1). Después de una simple agrupación, la relación  $E_b/N_o$  se convierte en una multiplicación de dos términos, donde el primer multiplicando es la relación de portadora a interferencia de la señal  $CIR$  (del inglés *Carrier to Interference Noise*), y el segundo es la relación entre la tasa de transmisión entre el ancho de banda CDMA, término que se conoce como la ganancia de proceso (ecuación (5.2)).

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{\frac{P_m}{R}}{\frac{I_{tot}}{W}} \quad (5.1)$$

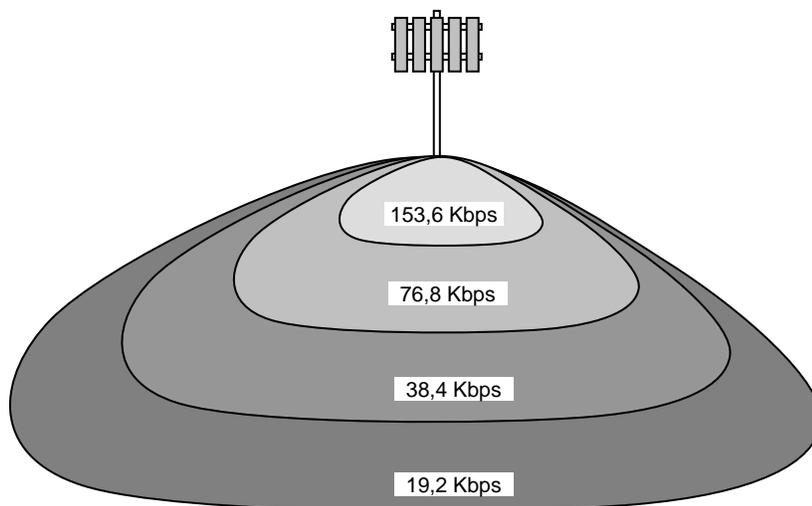
$$\frac{E_b}{N_o} = \left( \frac{P_m}{I_{tot}} \right) \left( \frac{W}{R} \right) = CIR \cdot \left( \text{Ganancia de Proceso} \right) \quad (5.2)$$

La tasa de transmisión  $R$  para una llamada de voz es de 9,6 kbps. En las llamadas de datos, la tasa puede tomar los valores de 19,2; 38,4; 76,8 y hasta 153,6 kbps, es decir, se aumenta en una relación que va de 2 hasta 16 veces con respecto a una llamada de voz. En esa misma proporción se va a disminuir la ganancia de procesamiento (ecuación (5.2)).

Dado que el  $E_b/N_o$  se debe mantener también al menos en 4 dB para las llamadas de datos, entonces, debido a que al transmitir datos la ganancia de procesamiento disminuye, se debe aumentar la relación  $CIR$ . Esto es posible aumentando la potencia que se transmite al móvil, o disminuyendo la interferencia total que este percibe.

Con las antenas inteligentes, se puede lograr ambos objetivos. Al ajustar la ganancia en una dirección determinada, se puede aumentar la potencia que el móvil captará. De igual manera, al ajustar convenientemente los patrones de radiación de las antenas para crear nulos en las direcciones que generan interferencia en los móviles, se disminuye la proporción de ruido percibido.

La ecuación (5.2) también puede ser analizada tomando en consideración la separación del móvil con respecto a la radio base. Cuando el móvil se encuentre muy próximo a la estación, es cuando va a percibir menos pérdidas por espacio libre, por lo que la señal recibida será mayor, pudiendo entonces alcanzar las más elevadas tasas de transmisión de datos. En cambio, al estar alejado, las pérdidas de espacio libre serán mayores, y por ende menor la potencia de recepción, imposibilitando la transmisión a mayor velocidad (Figura 5.4).

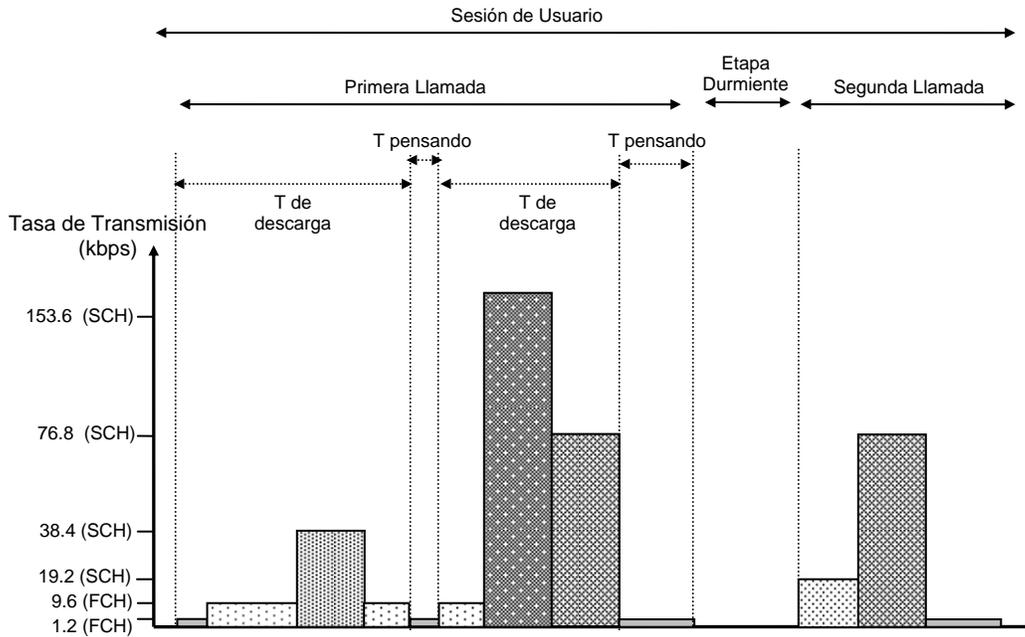


**Figura 5.4.** Tasas de transmisión, según la separación entre el móvil y la radio base.

## 5.8. Características de una llamada de datos

El proceso de transmisión de datos, tanto en el sentido ascendente como en el descendente, emplea canales fundamentales y canales suplementarios. Siempre que se inicia una llamada de datos, se asigna un canal fundamental, y este se encargará de enviar la información de señalización, y también puede ser usado para retransmitir datos. Cuando se requiere enviar una ráfaga de datos, el sistema establecerá un canal suplementario (en adición al canal fundamental) para la transmisión a alta velocidad. El ancho de banda de un canal suplementario y la duración de la ráfaga es determinado por la cantidad de datos a transmitir, el número de recursos disponibles y las condiciones de Radio Frecuencia. En la primera fase de CDMA 3G1X, las velocidades de datos soportadas por un canal suplementario son de 19,2 kbps, 38,4 kbps, 76,8 kbps y 153,6 kbps.

La sesión de una llamada de datos empieza cuando los parámetros del usuario han entrado al sistema. Una vez iniciada la sesión, existen dos posibles etapas, la de llamada, que es cuando se realiza la transmisión, y donde el usuario tiene asignado un canal fundamental o un canal fundamental y un canal suplementario; y la etapa durmiente, que es la etapa donde aun está abierta la sesión del usuario, pero no se tiene asignado ningún recurso. (Ver Figura 5.5).



**Figura 5.5.** Proceso de una llamada de datos

En la etapa de llamada, cuando el usuario posee un canal fundamental, si este requiere la transmisión a una tasa superior a 9,6 kbps, entonces se asigna un canal suplementario, que transmitirá a alguna de sus cuatro velocidades posibles, dependiendo de las condiciones de RF. Todos los parámetros para establecer un canal suplementario son transmitidos por el canal fundamental. Cuando un canal fundamental no tiene información para transmitir, su velocidad puede bajar hasta 1,2 kbps con el objeto de minimizar interferencia. Si la llamada ha estado inactiva por un tiempo y el contador de inactividad expira el canal fundamental es liberado, para incrementar la capacidad del sistema.

### 5.8.1. Algoritmo SARA

Un canal suplementario transmite a mayor velocidad que un canal fundamental, y por eso emplea mayor potencia. Este hecho incrementa la interferencia y puede degradar la capacidad del sistema. La estación base posee un módulo llamado Asignación de recursos de aire suplementarios *SARA* (del inglés *Supplemental Air Resource Allocation*), diseñado para administrar los recursos para el canal suplementario en los enlaces ascendentes y descendentes y para controlar los niveles de interferencia del sistema. Este módulo determina la velocidad de los datos y la duración de la ráfaga.

Cuando se requiere un canal suplementario, se interroga a *SARA* para determinar si hay suficientes recursos de interfaz de aire para la asignación, y los valores para el control de potencia. Antes de interrogar a *SARA*, el proceso de la llamada determina el máximo de la velocidad en el canal suplementario basado en la disponibilidad de códigos Walsh y otros

recursos de software y hardware. En este cálculo no se toma en cuenta los recursos de Radio Frecuencia, *SARA* es quien decide tomando en consideración este aspecto.

### **5.8.2. Proceso de relevo durante una llamada de datos.**

El proceso de relevo para una llamada de datos, es diferente al de una llamada de voz. Para el canal fundamental descendente, la llamada puede tener simultáneamente hasta 3 radio bases en la lista de activos, al igual que las llamadas de voz, pero el canal suplementario tan sólo es manejado por una radio base. Dado que es necesario que el canal suplementario sea servido por la mejor radio base, dinámicamente se realiza un proceso de relevo, llamado transferencia de ancla, donde el canal suplementario es cambiado de una a otra celda de servicio, de las incluidas en la lista de activas del canal fundamental. El proceso de transferencia de ancla es similar a un relevo duro.

El canal suplementario ascendente emplea hasta 3 radios bases, al igual que el canal fundamental. La velocidad de transmisión definitiva va a estar determinada por la combinación de todas las radio bases involucradas. Por ejemplo, se puede disponer de una radio base que transmite a 153,6 kbps, pero si las dos restantes van a 19,2 kbps, la tasa final de transmisión ascendente será de 19,2 kbps.

## **5.9. Transmisión de datos en espacios exteriores e interiores.**

Para comprender el impacto que podrían ocasionar las antenas inteligentes en el desempeño de la transmisión de datos, es necesario realizar un análisis que considere por separado los espacios interiores y exteriores. En cuanto a los exteriores, una de las situaciones más comunes donde el usuario puede estar transmitiendo datos, es cuando se desplaza en un vehículo, y con su equipo portátil, está llevando a cabo una navegación en Internet, o está conectado a una red de datos. En cuanto a los espacios interiores, se espera movilidad prácticamente nula, y puede corresponder a la situación en que el usuario se encuentra en su oficina, y está intercambiando información con su red de datos corporativa.

Ambos espacios poseen condiciones de RF claramente diferenciadas. En los espacios exteriores, donde es posible la movilización en automóviles, se pueden captar rápidos desvanecimientos de la señal, debido al efecto “sombra” causado por grandes obstáculos. Para el caso de los espacios interiores, las variaciones de la señal no son tan pronunciadas, pero las estructuras de las edificaciones atenúan las ondas electromagnéticas, por lo que la potencia recibida en el móvil puede ser inferior.

### **5.9.1. Cobertura en exteriores**

El escenario más factible, y a la vez más exigente, donde un usuario podría estar realizando una llamada de datos en espacios exteriores, sería desplazándose a velocidad vehicular. Es por esto que se iniciará el análisis de la cobertura en espacios exteriores,

considerando el comportamiento a nivel de RF, cuando un usuario se desplaza dentro de un vehículo.

La calidad del servicio en los sistemas CDMA está determinado por los niveles de  $E_b/N_0$ , tanto en el sentido ascendente como en el descendente. En ambos casos, el  $E_b/N_0$  estará condicionado por los desvanecimientos, multi-trayectos, diversidad de relevo suave y velocidad del móvil. Con respecto al último aspecto, existe una relación de proporcionalidad inversa con el  $E_b/N_0$ , a mayor velocidad peor será el  $E_b/N_0$ . Para la potencia recibida la relación es directa, a mayor potencia, mayor será la  $E_b/N_0$ . La cantidad de pilotos activos que sirven a la llamada en los relevos suaves, también impactan el desempeño, cuando se tiene tres pilotos activos, el  $E_b/N_0$  será mejor que en el caso de dos pilotos y de un piloto.

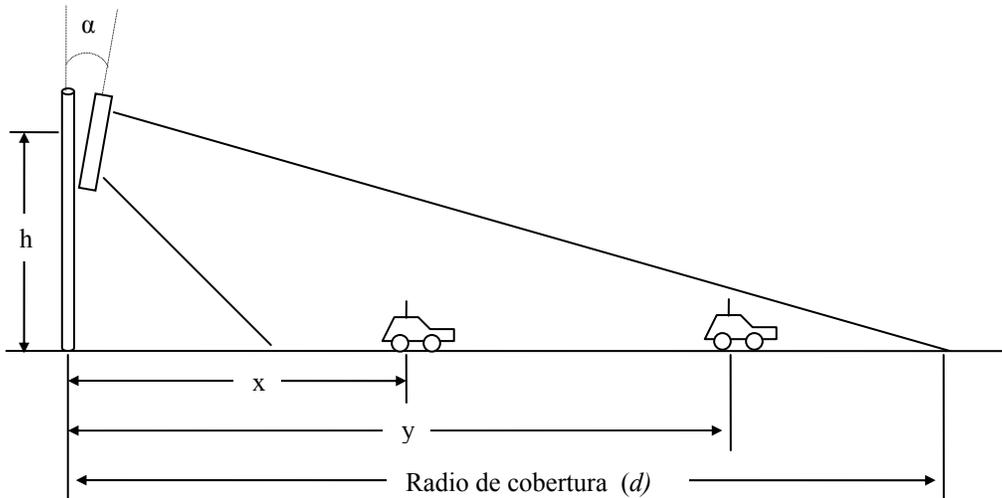
Existen otras variables del sistema que también afectan el desempeño de la calidad de la llamada, pero que no son tan fácilmente ajustables. Por ejemplo, los multi-trayectos se contrarrestan en el sentido ascendente mediante antenas de diversidad en la radio base, pero en cambio en el descendente, no existe diversidad en el móvil. El control de potencia de subida ayuda en las condiciones de desvanecimiento lento, sin embargo, el control de potencia de bajada no es tan rápido y por lo tanto su desempeño no es tan bueno.

En definitiva, existe una serie de aspectos propios del sistema, que gobiernan la relación del  $E_b/N_0$ , como lo son los mecanismos de control de potencia, diversidad, etc. Otro conjunto de elementos, como la densidad de las radio bases y la distribución geográfica de las misma, son variables que controla el ingeniero de RF, y que impactan directamente en las relaciones de las señales recibidas en el móvil, tanto en la llamada de voz y de datos, y para espacios interiores y exteriores.

#### **5.9.1.1. Solución para exteriores: Aumento de densidad de RBS.**

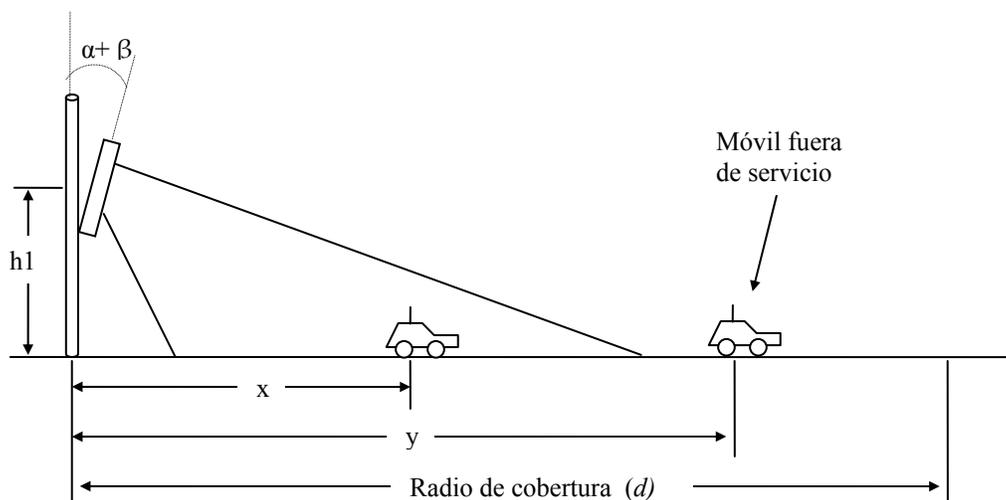
Como se mencionó en el apartado 5.6, las más altas tasas de transmisión pueden ser alcanzadas cuando la potencia de recepción del móvil aumenta, o cuando la interferencia total disminuye. La solución para exteriores presentada en este sub-capítulo, se fundamenta en el aumento del nivel de señal recibida por el móvil, como mecanismo para permitir la transmisión a mayor velocidad.

El esquema consiste en incrementar la densidad de radio bases. Esto se logra reduciendo los radios de coberturas de las estaciones base, al mismo tiempo que se aumenta el número de estas. En la Figura 5.6 se muestra una radio base con altura  $h$ , inclinación hacia abajo de la antena de  $\alpha$  grados, y radio de cobertura  $d$ . Un móvil que se encuentra en el punto  $x$ , va a poder transmitir a una tasa de transmisión superior a la de un móvil ubicado en el punto  $y$ , debido a que las pérdidas en el espacio libre son superiores, asumiendo que ambos tienen línea de vista con la antena de transmisión.



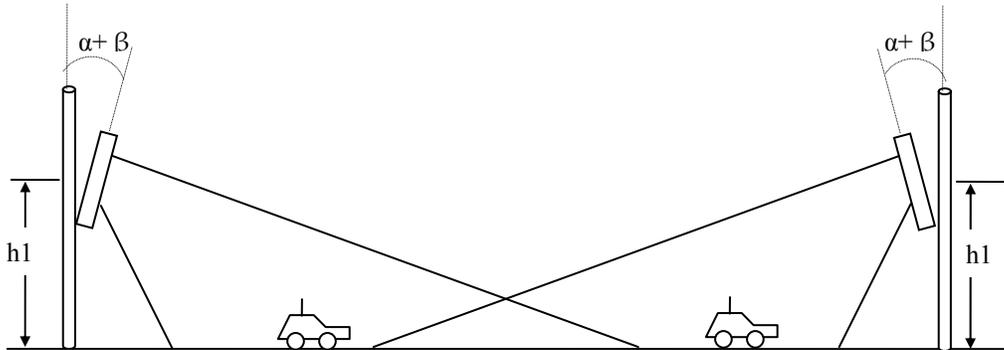
**Figura 5.6.** Estación base con radio de cobertura  $d$ , altura  $h$ , e inclinación de  $\alpha$

Si ahora se aumenta la inclinación de la antena en  $\alpha + \beta$  grados, y se disminuye la altura de la antena, el nuevo radio de cobertura será  $d_1$  (Figura 5.7). Debido a los ajustes, el móvil  $x$  captará la señal de la radio base con mayor intensidad, porque ahora las ondas electromagnéticas recorren un camino menor. Por otra parte, el móvil  $y$ , ha quedado fuera del área de cobertura. Es preciso colocar otra estación para poder ofrecer servicio a este móvil. En la Figura 5.8 se presenta el caso donde se incluye una segunda radio base. Bajo esta condición, el móvil  $y$  va a captar con mayor potencia la señal, que cuando era servido por la radio base 1.



**Figura 5.7.** Reducción del radio de cobertura de la estación base.

Es importante no sólo incrementar el número de radio bases, sino también ajustar los radios de cobertura, de tal manera que se aumente la potencia recibida en el móvil y que se controle los niveles de interferencia del sistema.



**Figura 5.8.** Esquema donde se incrementa la densidad de radio bases

El incremento de la densidad de las radio bases, tiene importantes consideraciones a nivel de costo. En cuanto a la inversión inicial, se percibe un incremento considerable debido a la adquisición de los nuevos equipos. Debido a mantenimiento, también aumentan los costos, por concepto de las nuevas cuotas para el alquiler de los espacios de las nuevas radio bases. Como se puede apreciar, el aumento de la densidad de las radio bases tiene un importante impacto financiero, que debe ser estudiado con detenimiento para garantizar la rentabilidad del negocio.

A nivel de implementación, también se tiene una serie de complicaciones. Buena parte de las estaciones ubicadas en áreas urbanas se encuentran en las azoteas de los edificios, donde las antenas son soportadas por mástiles. En estos casos probablemente no se pueda disminuir las alturas de las antenas y tan solo se tenga la posibilidad de ajustar la inclinación. En estos casos se está reduciendo a una la gama de variables que pueden ser cambiadas, por lo que probablemente no se tenga tanta flexibilidad para ajustar el radio de cobertura.

### **5.9.1.2. Aumento de densidad de RBS vs. Antenas inteligentes.**

Los beneficios que brindan las antenas inteligentes para la transmisión de datos en espacios exteriores de cierto modo ya fue discutido en capítulo 4 donde se presentaron los beneficios de las antenas inteligentes en los sistemas celulares, ya que la transmisión no es más que un tipo de llamada con unos requerimientos especiales en cuanto a potencia.

Dado el bajo porcentaje de explotación que presenta el servicio de datos empleando las redes CDMA 3G1X, las antenas inteligentes parecieran ser las más aptas para cubrir las necesidades puntuales de incremento de potencia debido a datos. Cuando un usuario o un grupo de usuarios requieran en un momento dado transmitir datos, mediante las antenas

inteligentes se podría ajustar convenientemente el patrón de radiación para obtener la máxima ganancia en la dirección del usuario y disminuir la interferencia en el área, para que así se alcance las máximas velocidades.

En el momento que los servicios multimedia de los sistemas celulares tomen auge, la cantidad de usuarios de datos será mucho mayor, y por lo tanto la potencia total requerida debido a todos los usuarios será más elevada. Bajo estas condiciones, se requiere una mayor capacidad en cuanto a interfaz de aire, aspecto que no puede ser cubierto con las antenas inteligentes, pero sí con el esquema de aumento de densidad de radio bases.

## **5.9.2. Cobertura en interiores.**

La cobertura en espacios interiores, es decir, dentro de las casas, oficinas y edificios, constituye un punto de interés para los ingenieros de diseño de los sistemas de telefonía celular. Usualmente al momento de la planificación de nuevas redes, se especifican unas condiciones de niveles de señal ( $P_{tx}$  y  $P_{rx}$ ) y de calidad de la comunicación ( $FER$  y  $E_b/N_0$ ), que deben ser satisfechas dentro de las áreas interiores.

Las paredes y columnas que conforman las estructuras de las edificaciones, actúan como atenuadores que obstruyen la libre propagación de las ondas electromagnéticas. Mientras más divisiones tenga el área de un piso de un edificio, mucho más difícil será el acceso de las señales radio-eléctricas a las zonas más internas de ese piso. De igual manera, los materiales empleados en la construcción de los edificios juegan un papel importante en la propagación. Típicamente los edificios elaborados con concreto y acero, tienen peor cobertura en comparación con los edificios de fachadas de vidrio.

### **5.9.2.1. Tipos de problemas en las áreas interiores.**

Los problemas en los espacios interiores se encuentran generalmente en los pisos más altos de los edificios elevados, o en las partes más bajas, como los sótanos. En las áreas de elevación intermedia que va desde la planta baja y el piso 1, hasta los piso 8 o 10, los parámetros de calidad de servicio se encuentran dentro de los rangos permisibles.

En los edificios de gran elevación que superan los 30 metros de alturas, es común encontrar en los pisos más altos, problemas de acceso, de calidad de la señal y de llamadas caídas. Los síntomas característicos son: bajos niveles de señal recibida, y elevados porcentajes de  $FER$ , tanto en el sentido descendente como en el ascendente.

Los pisos superiores de los edificios altos, se encuentran una cuantos metros por encima de las alturas típicas de las antenas de las radio bases. Esto produce que no exista ninguna señal fuerte en el área, ya que los lóbulos principales de las antenas no apuntan hacia estas zonas, y además, es posible que se tenga línea de vista directa con varias estaciones. En definitiva se tiene una situación donde no existe el predominio de la señal de ninguna radio base y se capta un grupo importante de señales con el mismo nivel, aspectos

que conllevan a una situación de interferencia, o como se conoce en los términos de CDMA, contaminación de canales pilotos.

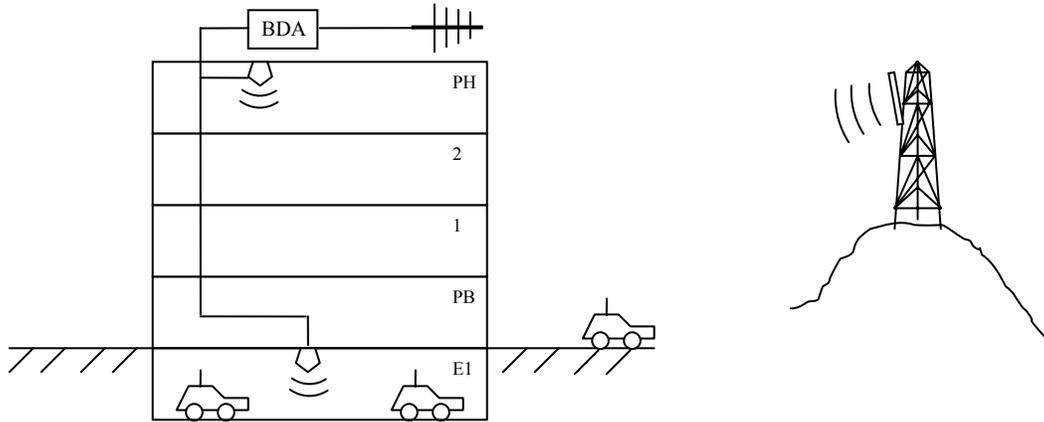
Escenario diferente lo constituyen las áreas de sótanos y estacionamientos. Estas generalmente se encuentran en niveles subterráneos, donde es muy difícil la propagación de las ondas radio-eléctricas, debido a los múltiples obstáculos presentes entre estas áreas y las estaciones bases. Como aspecto característico del problema, el nivel de potencia recibida usualmente está por debajo del umbral mínimo.

### **5.9.2.2. Soluciones para espacios interiores.**

Los dos tipos de problemas señalados en el apartado anterior, interferencia en los pisos altos y baja señal en las áreas subterráneas, se resuelven de manera idéntica: bañando al área con deficiencia de servicio, con una señal suficientemente intensa de una radio base. Dado que esto es difícil de lograr con antenas que se encuentren externas al edificio, la solución comúnmente empleada consiste en instalar pequeñas antenas dentro del área que presenta las deficiencias. Las señales radio eléctricas que irradiaran las antenas, provendrán de una radio base destinada exclusivamente para el área interior, o de un amplificador bi-direccional, que incrementa el nivel de señal de las radio bases exteriores.

La densidad de potencia irradiada dentro de un área interior, donde se encuentran muy cerca las personas, según los estándares internacionales, no puede superar  $1 \text{ mW/cm}^2$ . Por esta razón los niveles de potencia entregados a las antenas colocadas en espacios interiores, no pueden superar la cantidad de  $1 \text{ W}$ , aproximadamente  $10 \text{ dB}$  menos que la potencia de las radio bases externas. Esto conduce a que áreas muy extensas tengan varias antenas ubicadas estratégicamente, para dar cobertura a todo el espacio.

Los problemas de cobertura en áreas cuyas extensiones no exceden los  $1000$  metros cuadrados, generalmente pueden ser resueltos mediante la implementación de un sistema con un amplificador bidireccional *BDA* (del inglés *bi-direccional amplifier*). Como se puede ver en la Figura 5.9, se dispone de 3 elementos, una antena donante, encargada de captar las señales provenientes de una radio base exterior; el amplificador bi-direccional, el elemento activo de sistema que amplifica entre  $50$  y  $80 \text{ dB}$  la señal entregada por la antena donante; y las antenas de servicio, que son aquellas que se deben colocar en los espacios con problemas de cobertura, y que irradiarán la señal de la radio base externa, amplificada por el *BDA*.

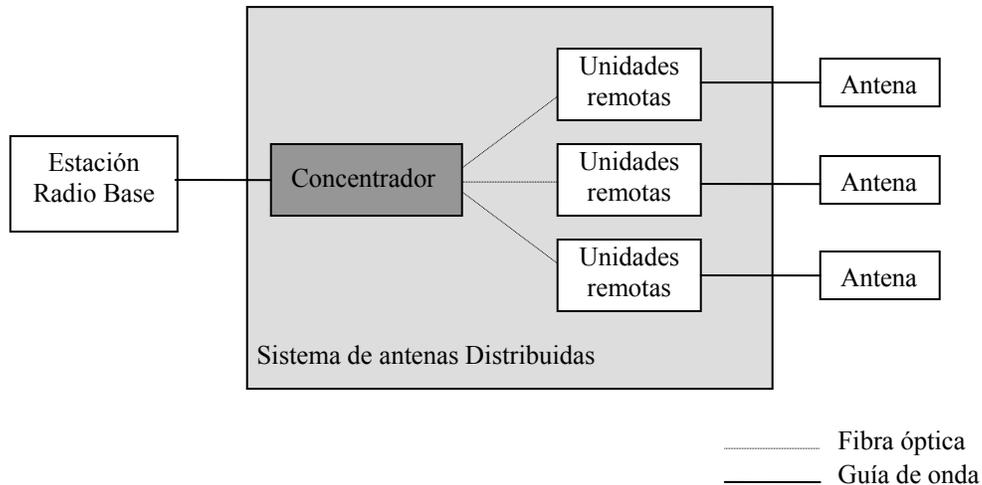


**Figura 5.9.** Implementación para solucionar problemas de cobertura de interiores.

La conexión entre las antenas y el amplificador, se hace a través de guías de ondas. Como las antenas de servicio deben ser conectadas al mismo puerto, se requiere de dispositivos divisores de potencia, para poder realizar la conexión al mismo punto. Esto es un aspecto importante a considerar, ya que a medida que se necesitan más antenas de servicio para la implementación, mayor será la atenuación de la señal a través de la ruta de conexión. Por ejemplo, si se dispone de un sistema de 2 antenas de servicio, la potencia entregada a cada antena, será 3 dB menos que si se tuviera tan sólo 1 de ellas, igualmente, si se requiere 4 antenas, la relación sería 9 dB por debajo. Es por esta razón, que este tipo de implementación es recomendable para áreas cuyas extensiones no requieren de muchas antenas de servicio, porque como la potencia es limitada, a mayor cantidad de antenas, menor será la potencia entregada a cada una de ellas.

Cuando la extensión de superficie es amplia, y además el tráfico que se cursará en la zona es significativo, la implementación más apropiada para el lugar, es una estación radio base, conectada a un sistema de antenas distribuidas (Figura 5.10). Generalmente este tipo de instalación emplea más de 5 antenas, y es ideal para edificios con problemas en varios pisos, para centros comerciales, para aeropuertos, etc.

Los sistemas de antenas distribuidos están constituidos por dos componentes, un concentrador que se conecta a la radio base, y los elementos remotos, que entregan la energía a cada una de las antenas de servicio. La conexión entre el concentrador y los elementos remotos, usualmente se realiza a través de fibra óptica. Este aspecto disminuye las pérdidas debido a largos trayectos, además que garantiza que la potencia entregada a cada antena remota, sea independiente y ajustable.



**Figura 5.10.** Implementación con sistema de antenas distribuidas, para espacios interiores.

### 5.9.2.3. Implementación de antenas inteligentes para espacios interiores.

De los dos problemas de espacios interiores discutidos en 5.9.2.1, el que podría ser resuelto mediante la implementación de antenas inteligentes, sería el problema de interferencia en los pisos más altos de edificios elevados. Como los sistemas de antenas inteligentes proveen mecanismos para disminuir la interferencia, creando nullos en la dirección de las señales no deseadas, y aumentando la ganancia en las zonas donde se irradia la información de interés, se podría disminuir el problema de polución de pilotos en los altos pisos.

Un aspecto a considerar, es la capacidad que puedan tener las antenas inteligentes para ajustar el patrón de radiación, pero en el plano vertical. Si bien es cierto que los análisis teóricos del capítulo 4.3, indican que los pesos de los ponderadores son números complejos que consideran el espacio tridimensional, en ninguna de las documentaciones consultadas hace referencia al ajuste en el patrón vertical de radiación. Por lo tanto sería necesaria una comprobación práctica del ajuste vertical en los patrones de radiación, antes de llevar a cabo cualquier implementación, que busque solucionar problemas de interferencia en pisos altos.

Dado que la interferencia se produce tanto en el sentido ascendente como en el descendente, se necesitaría para solucionar el problema en ambas direcciones, implementar un sistema de antenas inteligentes que ajuste el patrón en subida y en bajada. De hacerle tan sólo en el ascendente, el usuario probablemente perciba la degradación en el servicio.

## 6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS RADIO BASES

### 6.1. Introducción.

En el capítulo 4, se resaltaron los beneficios que se obtienen en los sistemas celulares al implementar antenas inteligentes. Entre las ventajas se encuentra la capacidad de ajustar los patrones de radiación según la demanda de tráfico. Esto permite orientar un lóbulo de máxima ganancia, en la dirección donde se encuentra una concentración de abonados, y de la misma manera, da la facilidad para crear lóbulos nulos en áreas donde la señal puede interferir la comunicación.

Para ejemplificar el concepto de ajuste de patrón, considere el caso de una estación base conformada por 3 sectores, y que deben dar cobertura a una autopista, a una zona comercial, y a una zona residencial, asumiendo que cada una de estas áreas, están claramente separadas. En un esquema tradicional, se destinaría un sector para cada área por separada. En cambio, para los sistemas con antenas inteligentes, se podría ajustar los patrones para obtener el máximo provecho de la potencia disponible en los tres sectores, para cubrir la demanda de tráfico a lo largo del día. Por ejemplo, en las primeras horas de la mañana, cuando se produce la congestión en la autopista, se podrían destinar dos sectores para dar cobertura a esta, mientras se destina al tercer sector la tarea de abarcar las zonas residenciales y comerciales. A medida que transcurre el día se puede ajustar de nuevo los patrones según la concentración de usuarios en las diversas áreas. En el horario laboral, se podría destinar los lóbulos de dos sectores hacia el área comercial, y con el otro sector, sencillamente cubrir las áreas de la autopista y residencial, debido a su bajo tráfico. Así los lóbulos de los tres sectores se ajustarían a lo largo del día según las exigencias de tráfico que se presenten en las áreas de cobertura de la radio base.

El comportamiento descrito en las líneas anteriores puede ser estudiado a través de las mediciones de tráfico de las radio bases. Con dichas cantidades se podría caracterizar las variaciones en los focos de suscriptores, que serviría de entrada para el controlador de un sistema de antenas inteligentes.

El tráfico celular se mide en unidades de Erlangs, que representa un canal ocupado por el lapso de una hora. La máxima intensidad de tráfico que puede ser manejado por un grupo troncal conformado por  $N$  canales, es igual a  $N$ . En las radio bases CDMA, el tráfico puede ser medido en los circuitos ocupados que van hacia la central, o mediante la contabilización de los códigos Walsh ocupados con canales de tráfico.

Los análisis estadísticos presentados en este capítulo están centrados únicamente en las mediciones de tráfico, debido en primera instancia a que permiten cuantificar las variaciones de la demanda de tráfico en función de las áreas geográficas de cobertura, y segundo, que el tráfico está relacionado directamente con la capacidad del sistema, aspecto que se busca solucionar con la implementación de las antenas inteligentes. Las demás mediciones de desempeño de la red, como lo son el porcentaje de acceso al sistema, el porcentaje de llamadas completadas y el porcentaje de llamadas caídas, entre otras,

quedaron excluidas ya que no hay una manera de relacionar los análisis estadísticos de estas variables, con el comportamiento que tendría la red con la implementación de antenas inteligentes.

## **6.2. Finalidad del estudio**

El estudio que se presenta a continuación tiene por finalidad calcular cual es el porcentaje de variación del tráfico de cada sector, con respecto al tráfico total de cada celda, para de esta manera determinar si se justifica la implementación de antenas inteligentes que permitan el ajuste de sus patrones de radiación en función de los focos de tráfico.

## **6.3. Estudio de variación de tráfico entre sectores.**

### **6.3.1. Consideraciones.**

Movilnet dispone en la actualidad de dos redes celulares superpuestas, que emplean dos tecnologías de acceso diferente: la red TDMA IS-54 y la red CDMA 3G1X. Si bien es cierto que el estudio que se está realizando es el impacto de los sistemas de antenas inteligentes en las redes CDMA, se empleará la información estadística de ambas redes. En particular la red TDMA podrá brindar mayor cantidad de información, debido a lo siguiente:

- 1) La red TDMA posee 2.200.000 suscriptores, cantidad 4,4 veces superior a la de red CDMA (500.000 suscriptores). En cuanto a la ocupación diaria promedio, también existe una clara diferencia: 200.000 Erlangs para TDMA, y 80.000 Erlangs para CDMA.<sup>1</sup>
- 2) La red TDMA posee 7 años de funcionamiento. A lo largo de ese período, los ingenieros de RF han depurado las variables de radio frecuencia que impactan el desempeño de la red, como lo son los porcentajes de acceso al sistema, porcentajes de llamadas completadas exitosamente, porcentajes de llamadas caídas, etc. Este aspecto brinda mayor confiabilidad a dicha red, en comparación con el sistema CDMA, que apenas tiene 2 años en servicio, y donde aun existen muchos aspectos que deben ser mejorados.
- 3) Las estadísticas del sistema TDMA van a brindar cálculos más confiables de las variaciones en el tiempo de los focos de tráfico, ya que el área de cobertura de cada sector está bien delimitado gracias a que los procesos de llamada (acceso, relevo y control de potencia) están regidos por las mediciones de potencia de los canales de control. En los sistemas CDMA, a diferencia del TDMA, los procesos de llamada se realizan a partir de mediciones relativas de nivel de señal a interferencia, aspecto que genera que las huellas de cobertura dependan de las condiciones de RF presentes en un momento dado.

---

<sup>1</sup> Información actualizada para el mes de Mayo de 2004.

### **6.3.2. Selección de las muestras.**

El análisis estadístico se realizó sobre el conjunto de radio bases que dan servicio al área de la Gran Caracas, esto incluye el área metropolitana y todas las regiones aledañas que abarca los Altos Mirandinos, el valle de Guarenas, el litoral central y el oriente Mirandino.

Se empleo como período de muestreo los 4 viernes del mes de mayo de 2004. La experiencia a lo largo de los años de servicio de tanto la red CDMA como la TDMA ha determinado que todas las radio bases experimentan el volumen más elevado de tráfico los días viernes de cada semana, a excepción de casos puntuales. Es por esto que se emplea la información estadística de los viernes. Se toma la información de 4 días para garantizar que no se haya producido un evento especial que haya alterado el normal desenvolvimiento estadísticos de las radio bases.

Para la selección del período de estudio de cada radio base se empleo el siguiente criterio: en primer lugar se busca la máxima ocupación de tráfico de la celda para un día. Después se calcula el 70% del valor pico, y con esta cantidad se determina a que hora de la mañana el tráfico cursado es mayor, y a que hora de la tarde el tráfico cursado es menor que el 70% del valor pico. En líneas generales los períodos estaban comprendidos entre las 9 a.m. y las 8 p.m.

Se consideraron para el estudio las radio bases de 2 y 3 sectores. A partir de esa selección se tomó en cuenta las radio bases que cursaban al menos 5 Erlangs por sector, en la hora pico del día. Este aspecto buscaba emplear muestras que fuesen más representativas, donde se considerase las estaciones que generan la mayor cantidad de ingresos a la compañía, y que debido a la alta ocupación de tráfico, pudiesen justificar la implementación de antenas inteligentes.

### **6.3.3. Cálculos estadísticos realizados.**

El estudio estadístico se realizó a un universo de 155 radio bases pertenecientes al sistema TDMA, e igual número de estaciones del sistema CDMA. En las secciones siguientes, se presentará el detalle de las estadísticas de un grupo seleccionado de radio bases, con la finalidad de ilustrar los resultados obtenidos con el estudio. La información concerniente al resto de las estaciones, aparece en el anexo de este documento.

El análisis estadístico realizado a cada una de las radio bases fue el siguiente:

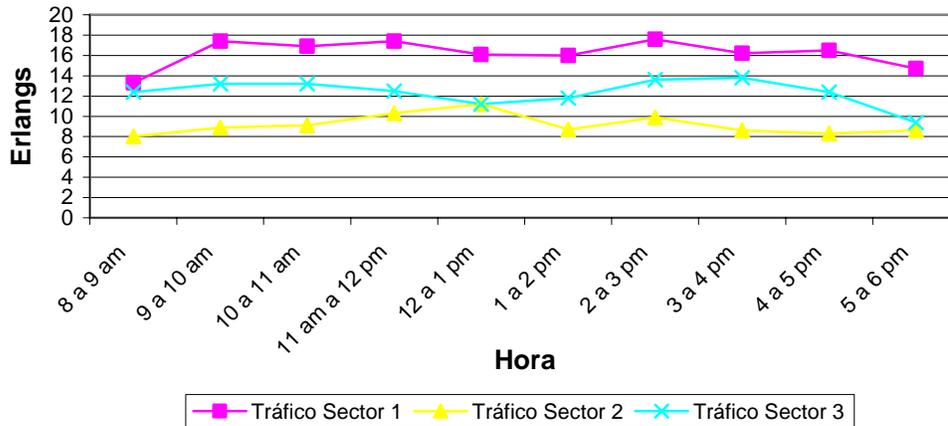
Para cada hora, se totalizó el tráfico de los sectores de cada radio base. Con esto se obtuvo el porcentaje de cada sector con respecto al total de la estación base. Después, se calculó el promedio y la desviación estándar de los porcentajes de ocupación con respecto al total de las horas. Esto último es lo que permitirá determinar cuales radio bases, presentan variaciones en los focos de tráfico a lo largo del día. En la Tabla 6.1, se muestra un ejemplo de la información procesada para la radio base TDMA de Plaza Venezuela.

Nombre de Radio Base	Hora	Tráfico Sector 1 (Erlangs)	Tráfico Sector 2 (Erlangs)	Tráfico Sector 3 (Erlangs)	Total Tráfico RBS (Erlangs)	% Tráfico Sector 1	% Tráfico Sector 2	% Tráfico Sector 3
Plaza Venezuela (TDMA)	8 am a 9 am	13,3	8	12,4	33,7	39,47%	23,74%	36,80%
	9 am a 10 am	17,4	8,9	13,2	39,5	44,05%	22,53%	33,42%
	10 am a 11 am	16,9	9,1	13,2	39,2	43,11%	23,21%	33,67%
	11 am a 12 pm	17,4	10,3	12,5	40,2	43,28%	25,62%	31,09%
	12 pm a 1 pm	16,1	11,2	11,2	38,5	41,82%	29,09%	29,09%
	1 pm a 2 pm	16	8,7	11,8	36,5	43,84%	23,84%	32,33%
	2 pm a 3 pm	17,6	9,9	13,6	41,1	42,82%	24,09%	33,09%
	3 pm a 4 pm	16,2	8,6	13,8	38,6	41,97%	22,28%	35,75%
	4 pm a 5 pm	16,5	8,3	12,4	37,2	44,35%	22,31%	33,33%
	5 pm a 6 pm	14,7	8,6	9,4	32,7	44,95%	26,30%	28,75%
Promedio						42,97%	24,30%	32,73%
Desviación Estándar						1,58%	2,15%	2,57%

**Tabla 6.1.** Ejemplo de análisis estadístico empleado en el estudio, para la radio base TDMA de Plaza Venezuela.

De los valores presentados en la tabla, se observa que la desviación estándar de los porcentajes de tráfico de los 3 sectores, se encuentra por debajo del 3%. Esto indica, que a pesar de las variaciones del tráfico total de la estación a lo largo del período de análisis, la proporción de tráfico entre los sectores se mantiene constante. Este hecho se hace aun más evidente en la Figura 6.1, donde se observa que para cada hora, las proporciones de los tráficos entre sectores se mantienen aproximadamente constantes, a pesar de la diferencia en los Erlangs cursados, hecho evidente en la similitud de la forma de las curvas. Del análisis de la gráfica y de los valores presentados en la tabla se puede inferir que la radio base TDMA de Plaza Venezuela, no requiere la implementación de antenas inteligentes, porque los valores de tráfico de los sectores a lo largo del día, no reflejan variaciones geográficas de los focos de ocupación.

### Tráfico por Sector de la RBS Plaza Venezuela (TDMA)

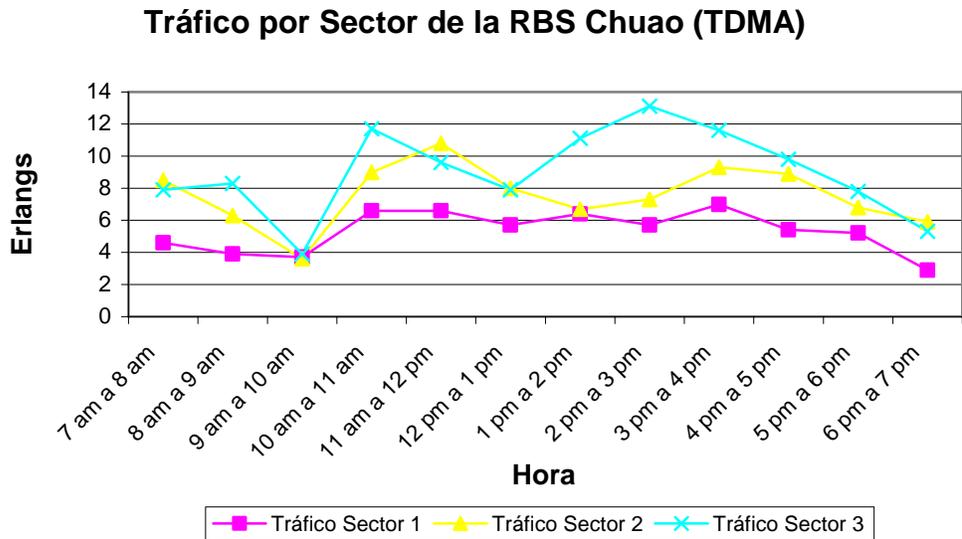


**Figura 6.1.** Tendencia de tráfico de la RBS TDMA de Plaza Venezuela.

En la Tabla 6.2, se presenta los datos estadísticos para la radio base TDMA de Chuao. En esta estación, las desviaciones estándar de los porcentajes de tráfico de los sectores son más elevadas que el caso de Plaza Venezuela, llegando a alcanzar valores cercanos al 5% para 2 sectores. Sin embargo, en la Figura 6.4 también se observa que las curvas presentan tendencias similares de comportamiento, a excepción del período entre las 11 a.m. y 12 p.m., donde el sector 2 supera al sector 3. A pesar de este aspecto, también se puede inferir que la radio base de Chuao tampoco ameritaría la implementación de antenas inteligentes.

Nombre de Radio Base	Hora	Tráfico Sector 1 (Erlangs)	Tráfico Sector 2 (Erlangs)	Tráfico Sector 3 (Erlangs)	Total Tráfico RBS (Erlangs)	% Tráfico Sector 1	% Tráfico Sector 2	% Tráfico Sector 3
Chuao (TDMA)	7 am a 8 am	4,6	8,5	7,9	21	21,90%	40,48%	37,62%
	8 am a 9 am	3,9	6,3	8,3	18,5	21,08%	34,05%	44,86%
	9 am a 10 am	3,7	3,6	3,9	11,2	33,04%	32,14%	34,82%
	10 am a 11 am	6,6	9	11,7	27,3	24,18%	32,97%	42,86%
	11 am a 12 pm	6,6	10,8	9,6	27	24,44%	40,00%	35,56%
	12 pm a 1 pm	5,7	8	7,9	21,6	26,39%	37,04%	36,57%
	1 pm a 2 pm	6,4	6,7	11,1	24,2	26,45%	27,69%	45,87%
	2 pm a 3 pm	5,7	7,3	13,1	26,1	21,84%	27,97%	50,19%
	3 pm a 4 pm	7	9,3	11,6	27,9	25,09%	33,33%	41,58%
	4 pm a 5 pm	5,4	8,9	9,8	24,1	22,41%	36,93%	40,66%
	5 pm a 6 pm	5,2	6,8	7,8	19,8	26,26%	34,34%	39,39%
	6 pm a 7 pm	2,9	5,9	5,3	14,1	20,57%	41,84%	37,59%
Promedio						24,47%	34,90%	40,63%
Desviación Estandar						3,43%	4,56%	4,66%

**Tabla 6.2** Análisis estadístico para la radio base TDMA de Chuao.



**Figura 6.2** Tendencia de tráfico de la RBS TDMA de Chuao.

La información estadísticas de la estación TDMA de la California, se presentan en la Tabla 6.3 y en el Figura 6.3. En este tercer caso, el sector 1 presentó una desviación estándar cercana a 5%, y para el sector 3 es mayor al 6%. Al observar el gráfico 3, es el sector 3 el que cursa la mayor cantidad de tráfico de la radio base, hasta las 3 de la tarde. A partir de ese momento, el sector 2 supera en tráfico cursado al sector 1, e inclusive a partir

de las 6 de la tarde tanto el sector 1 como el 2, manejan una cantidad de tráfico apreciablemente mayor a la del sector 3. Basado en el comportamiento observado en la gráfica, se infiere que la estación de la California podría ser apta para la implementación de antenas inteligentes, que permitan distribuir de manera óptima los recursos de potencia de la radio base, en el transcurso del día, a medida que se presentan los diversos focos de tráfico.

Nombre de Radio Base	Hora	Tráfico Sector 1 (Erlangs)	Tráfico Sector 2 (Erlangs)	Tráfico Sector 3 (Erlangs)	Total Tráfico RBS (Erlangs)	% Tráfico Sector 1	% Tráfico Sector 2	% Tráfico Sector 3
La California (TDMA)	7 am a 8 am	9,1	9,7	11,4	30,2	30,13%	32,12%	37,75%
	8 am a 9 am	10,8	10,7	13	34,5	31,30%	31,01%	37,68%
	9 am a 10 am	11,3	13,1	16,3	40,7	27,76%	32,19%	40,05%
	10 am a 11 am	11	14	15,2	40,2	27,36%	34,83%	37,81%
	11 am a 12 pm	12,2	12,4	14,2	38,8	31,44%	31,96%	36,60%
	12 pm a 1 pm	11,7	12,9	12,6	37,2	31,45%	34,68%	33,87%
	1 pm a 2 pm	10,6	14,3	14,7	39,6	26,77%	36,11%	37,12%
	2 pm a 3 pm	11,1	13,8	15,5	40,4	27,48%	34,16%	38,37%
	3 pm a 4 pm	12,7	16,5	14,8	44	28,86%	37,50%	33,64%
	4 pm a 5 pm	13,8	17,4	15,5	46,7	29,55%	37,26%	33,19%
	5 pm a 6 pm	13,5	14,7	13,2	41,4	32,61%	35,51%	31,88%
	6 pm a 7 pm	14,7	15,3	8,5	38,5	38,18%	39,74%	22,08%
	7 pm a 8 pm	14	11,9	7,6	33,5	41,79%	35,52%	22,69%
	8 pm a 9 pm	12,5	12,4	8	32,9	37,99%	37,69%	24,32%
	9 pm a 10 pm	7,7	8,1	4,7	20,5	37,56%	39,51%	22,93%
	Promedio					32,02%	2,72%	6,43%
	Desviación Estandar					4,70%	2,72%	6,43%

**Tabla 6.3** Análisis estadístico para la radio base TDMA de La California.

### Tráfico por Sector de la RBS La California (TDMA)

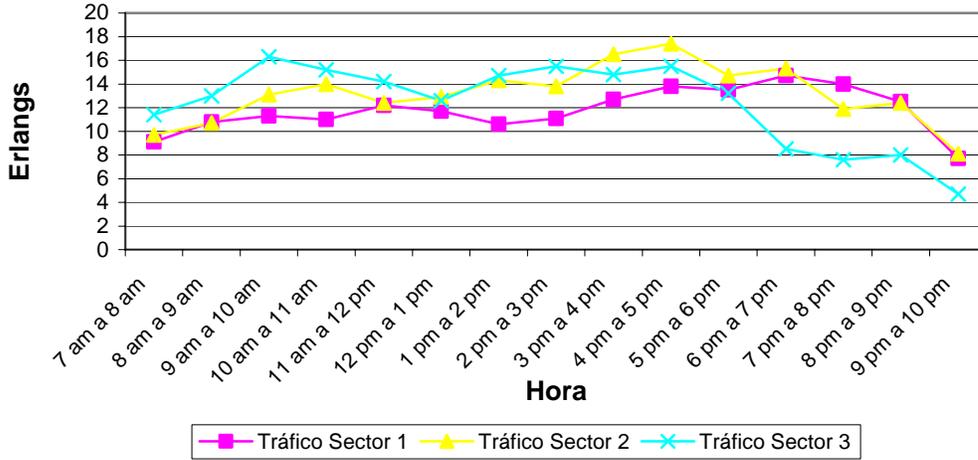


Figura 6.3 Tendencia de tráfico de la RBS TDMA de La California.

Basado en la observación de gráficas similares a la de las estaciones Plaza Venezuela, Chuao y la California, y en las desviaciones estándares de los sectores, se determinó cual sería el criterio a emplear para la selección de las radio bases donde las antenas inteligentes podría ayudar a solucionar los problemas en las variaciones de los focos de tráfico.

Se considerarán tres escalas de valores: la primera, toma en cuenta aquellas radio bases que al menos uno de sus sectores presenta una desviación estándar superior al 5%. Estas radio bases son las que requerirían la implementación de antenas inteligentes. En segundo lugar, están las radio bases que al menos poseen un sector con desviación estándar entre 4 y 5%. Estas estaciones, si bien en la actualidad no requieren antenas inteligentes, en un futuro, se podría presentar variaciones en los focos, que si lo ameriten. Por último, está el grupo de radio bases que no justifican la implementación de sistemas de antenas inteligentes, donde todos sus sectores presentan desviaciones estándares inferiores al 3%.

### 6.4. Resultados para el sistema TDMA

El estudio al sistema TDMA se realizó a un grupo de 155 radio bases. En esta sección se analizará las estadísticas de un grupo de ellas, pero el compendio de todas las estaciones está en los anexos de este documento.

Del total de 155 radio bases TDMA, 29 de ellas (18,7%) fueron descartadas en primera instancia, porque manejaban menos de 5 Erlangs por sector en la hora pico. Para este grupo de radio bases, no se justificaría la implementación de antenas inteligentes, inclusive aunque presente variaciones estándares de los porcentaje tráfico de los sectores superiores al 5%, ya que los ingresos que generan dichas estaciones no cubrirían los gastos de inversión de la antena inteligentes.

Del grupo de radio bases que cumplían el criterio de 5 Erlangs por sector en la hora pico, 45 de ellas poseen 2 sectores, y 81 estaciones, 3 sectores. En la Tabla 6.4, se muestra el compendio del universo de muestras estudiadas para el sistema TDMA

	Celdas descartadas por no cumplir criterio de 5Erl/sec en hora pico.	Celdas que cumplen criterio de 5Erl/sec en hora pico.
2 Sectores	19 celdas (12,35%)	45 celdas (29,03%)
3 Sectores	10 celdas (6,4%)	81 celdas (52,25%)
Totales	29 celdas (18,7%)	126 celdas (81,3%)

**Tabla 6.4** Universo de muestras empleado en el estudio para el sistema TDMA

Empleando el criterio de clasificación presentado en la sección anterior, se obtuvo que 21 radio bases (13,54%) presentaban desviaciones estándares en los porcentaje de tráfico de al menos 1 sector, superiores al 5%, y que por lo tanto son las celdas candidatas para la implementación de antenas inteligentes. De las radio bases que no superaron el criterio para la posible instalación de antenas inteligentes, 68 radio bases (43,87%) estaban en el rango entre 4 y 5% de desviación estándar, y 37 estaciones (23,8%) estaban por debajo del 3% de desviación estándar. En la Tabla 6.5 se muestra el detalle de los resultados, según el criterio de selección y el número de sectores.

	Aplica Antenas Inteligentes ( $\sigma > 6\%$ )	No Aplica Antenas Inteligentes ( $4\% < \sigma < 5\%$ )	No Aplica Antenas Inteligentes ( $\sigma < 3\%$ )
2 Sectores	7 (4,51%)	25 (16,12%)	13 (8,38%)
3 Sectores	14 (9,03%)	43 (27,74%)	24 (15,48%)
Totales	21 (13,54%)	68 (43,87%)	37 (23,87%)

**Tabla 6.5** Análisis de la distribución de las desviaciones estándares de los sectores.

### 6.4.1. Casos de estudio

En este apartado se presenta el análisis de dos radio bases que entraron en la clasificación de posibles sitios para la implementación de las antenas inteligentes. La finalidad de esto comprender como debería realizarse los ajustes de patrón en los sectores, para poder cubrir la demanda en los focos de tráfico.

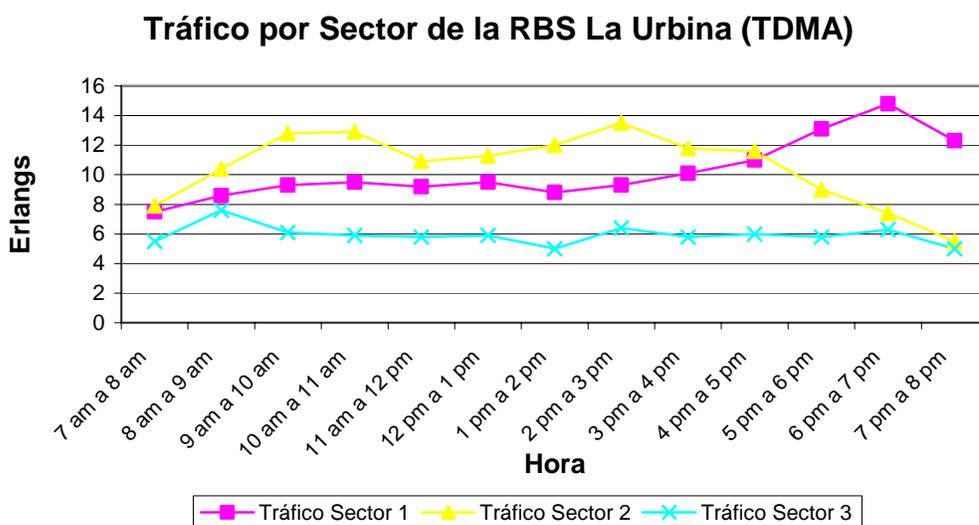
#### 6.4.1.1. Estación base: La Urbina TDMA.

La variación más notable en el tráfico de la estación La Urbina, se presenta en los sectores 1 y 2. El sector 2, es el que presenta la mayor ocupación de la radio base, en la mañana y en las primeras horas de la tarde. A partir de las 5 de la tarde, el sector 1 se convierte en el que maneja más tráfico (Tabla 6.6).

Con la implementación de antenas inteligentes que permitan el ajuste del patrón de radiación, se podría logra que hasta las 5 de la tarde una mayor proporción de potencia se destina para el sector 2, y a partir de ese momento se requiere un ajuste que asigna un mayor peso al sector 1 con respecto al 2.

Nombre de Radio Base	Hora	Tráfico Sector 1 (Erlangs)	Tráfico Sector 2 (Erlangs)	Tráfico Sector 3 (Erlangs)	Total Tráfico RBS (Erlangs)	% Tráfico Sector 1	% Tráfico Sector 2	% Tráfico Sector 3
La Urbina (TDMA)	7 am a 8 am	7,5	7,9	5,5	20,9	35,89%	37,80%	26,32%
	8 am a 9 am	8,6	10,4	7,6	26,6	32,33%	39,10%	28,57%
	9 am a 10 am	9,3	12,8	6,1	28,2	32,98%	45,39%	21,63%
	10 am a 11 am	9,5	12,9	5,9	28,3	33,57%	45,58%	20,85%
	11 am a 12 pm	9,2	10,9	5,8	25,9	35,52%	42,08%	22,39%
	12 pm a 1 pm	9,5	11,3	5,9	26,7	35,58%	42,32%	22,10%
	1 pm a 2 pm	8,8	12	5	25,8	34,11%	46,51%	19,38%
	2 pm a 3 pm	9,3	13,5	6,4	29,2	31,85%	46,23%	21,92%
	3 pm a 4 pm	10,1	11,8	5,8	27,7	36,46%	42,60%	20,94%
	4 pm a 5 pm	11	11,6	6	28,6	38,46%	40,56%	20,98%
	5 pm a 6 pm	13,1	9	5,8	27,9	46,95%	32,26%	20,79%
	6 pm a 7 pm	14,8	7,4	6,3	28,5	51,93%	25,96%	22,11%
	7 pm a 8 pm	12,3	5,5	5	22,8	53,95%	24,12%	21,93%
Promedio						38,43%	39,27%	22,30%
Desviación Estándar						7,50%	7,45%	2,46%

**Tabla 6.6** Análisis estadístico de la RBS La Urbina TDMA



**Figura 6.4.** Tendencia de tráfico de la radio base TDMA de la Urbina.

### 6.4.1.2. Estación base: Guaicoco TDMA.

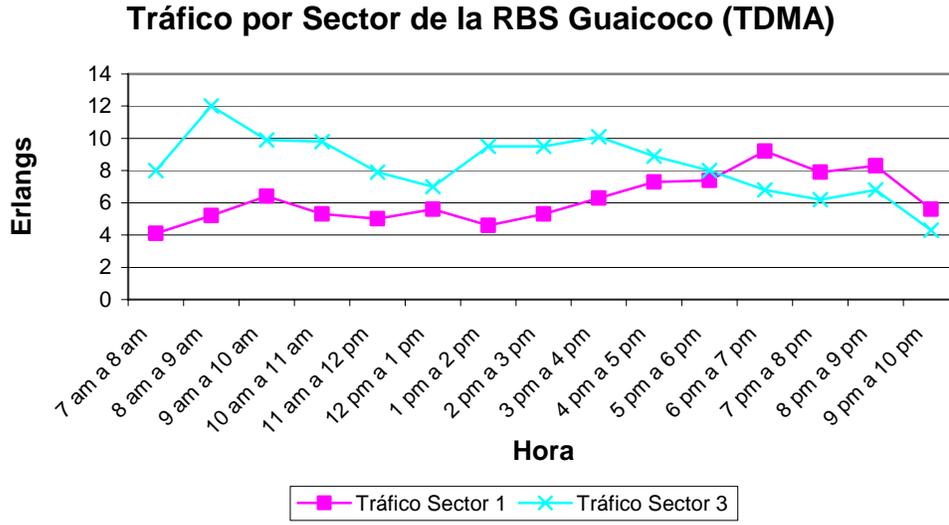
La estación que se presenta a continuación posee tan sólo 2 sectores. En la Figura 6.5 se observa que en las primeras horas del día, la diferencia entre tráfico del sector 1 es bastante superior al del sector 2. A medida que transcurre el tiempo, la diferencia entre ambos sectores se va acortando, y a partir de las 6 de la tarde, el sector 2 curso mayor cantidad de tráfico que el sector 1.

Del análisis de los valores estadísticos se desprende que la radio base Guaicoco podría requerir la implementación de antenas inteligentes. Sin embargo, el hecho que la radio base disponga tan sólo de 2 sectores, eso abre la posibilidad que agregar un tercer sector, que podría ayudar en el problema de capacidad. En el caso particular de la estación Guaicoco, se podría considerar la adición del otro sector, que esté destinado a descargar el tráfico del sector que tiene mayor ocupación en la hora pico, que corresponde al sector 2. Agregar un sector adicional a una radio base ya existente es mucho más económico que el sistema de antenas inteligentes.

El análisis que se realizó para la radio base Guaicoco, aplica para todas las radio bases que poseen 2 sectores y que entraron en el grupo de candidatas para la implementación de antenas inteligentes.

Nombre de Radio Base	Hora	Tráfico Sector 1 (Erlangs)	Tráfico Sector 2 (Erlangs)	Total Tráfico RBS (Erlangs)	% Tráfico Sector 1	% Tráfico Sector 2
Guaicoco (TDMA)	7 am a 8 am	4,1	8	12,1	33,88%	66,12%
	8 am a 9 am	5,2	12	17,2	30,23%	69,77%
	9 am a 10 am	6,4	9,9	16,3	39,26%	60,74%
	10 am a 11 am	5,3	9,8	15,1	35,10%	64,90%
	11 am a 12 pm	5	7,9	12,9	38,76%	61,24%
	12 pm a 1 pm	5,6	7	12,6	44,44%	55,56%
	1 pm a 2 pm	4,6	9,5	14,1	32,62%	67,38%
	2 pm a 3 pm	5,3	9,5	14,8	35,81%	64,19%
	3 pm a 4 pm	6,3	10,1	16,4	38,41%	61,59%
	4 pm a 5 pm	7,3	8,9	16,2	45,06%	54,94%
	5 pm a 6 pm	7,4	8	15,4	48,05%	51,95%
	6 pm a 7 pm	9,2	6,8	16	57,50%	42,50%
	7 pm a 8 pm	7,9	6,2	14,1	56,03%	43,97%
	8 pm a 9 pm	8,3	6,8	15,1	54,97%	45,03%
9 pm a 10 pm	5,6	4,3	9,9	56,57%	43,43%	
	Promedio				43,11%	56,89%
	Desviación Estandar				9,49%	9,49%

**Tabla 6.7** Análisis estadístico de la RBS Guaicoco TDMA



**Figura 6.5** Tendencia de tráfico de la estación TDMA de Guaicoco

## 6.5. Resultados para el sistema CDMA

En el estudio del sistema CDMA, se consideraron las mismas 155 ubicaciones que poseen estaciones TDMA, y que también tienen CDMA. De igual manera, se analizará un grupo de radio bases, pero el compendio de todas las estaciones se encuentra en el anexo.

Dado que la red CDMA no tiene la misma madurez que la anterior, el número de radio bases que no alcanzaban el criterio de 5 Erlangs por sector fue aun mayor, siendo un valor de 40%, que corresponde a 62 radio bases.

En la Tabla 6.8 se muestra la distribución del universo de radio bases CDMA empleadas para el estudio.

	Celdas descartadas por no cumplir criterio de 5Erl/sec en hora pico.	Celdas que cumplen criterio de 5Erl/sec en hora pico.
2 Sectores	28 celdas (18,06%)	25 celdas (16,12%)
3 Sectores	34 celdas (21,94%)	68 celdas (43,87%)
Totales	62 celdas (40%)	93 celdas (60%)

**Tabla 6.8** Universo de muestras empleado en el estudio para el sistema CDMA

Para el sistema CDMA se empleo los mismos rangos utilizados en el sistema TDMA (Tabla 6.9).

	Aplica Antenas Inteligentes ( $\sigma >6\%$ )	No Aplica Antenas Inteligentes ( $4 < \sigma < 5$ )	No Aplica Antenas Inteligentes ( $\sigma < 3\%$ )
2 Sectores	8 (5,16%)	15 (9,67%)	2 (1,29%)
3 Sectores	25 (16,12%)	30 (19,35%)	13 (8,38%)
Totales	33 (21,29%)	45 (29,03%)	15 (9,67%)

**Tabla 6.9** Análisis de la distribución de las desviaciones estándares de los sectores.

### 6.5.1. Casos de estudio

Al igual que el caso del sistema TDMA, se analizara un grupo de radio bases para caracterizar el comportamiento de sus sectores.

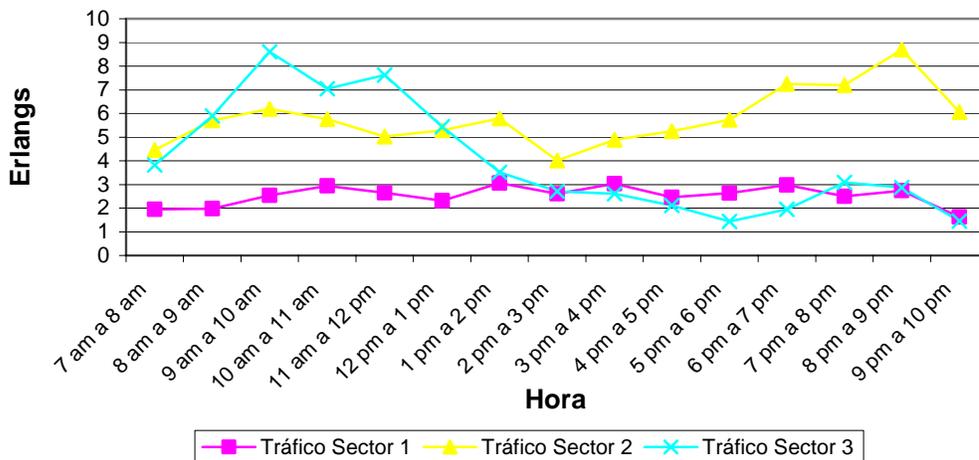
#### 6.5.1.1. Estación base: El Cementerio CDMA

En las primeras horas del día, en especial entre las 9 a.m. y 12 p.m. el sector 3 es el que cursa la mayor cantidad de tráfico, seguido por el sector 2 y luego por el 1. A partir de la 1 de la tarde, el tráfico del sector 3 cae por debajo de la cantidad de tráfico que maneja el sector 2, y comienza a cursar prácticamente el mismo tráfico que el sector 1. Al final del día, el tráfico del sector 2 es notable superior al tráfico de los sectores 1 y 3. Por la fuerte variación de tráfico de los sectores de El Cementerio, esta estación entre en el grupo de las candidatas para la implementación de antenas inteligentes. (Tabla 6.10 y Figura 6.6).

Nombre de Radio Base	Hora	Tráfico Sector 1 (Erlangs)	Tráfico Sector 2 (Erlangs)	Tráfico Sector 3 (Erlangs)	Total Tráfico RBS (Erlangs)	% Tráfico Sector 1	% Tráfico Sector 2	% Tráfico Sector 3
El Cementerio (CDMA)	7 am a 8 am	1,95	4,46	3,83	10,24	19,04%	43,55%	37,40%
	8 am a 9 am	1,97	5,71	5,89	13,57	14,52%	42,08%	43,40%
	9 am a 10 am	2,54	6,19	8,61	17,34	14,65%	35,70%	49,65%
	10 am a 11 am	2,94	5,76	7,05	15,75	18,67%	36,57%	44,76%
	11 am a 12 pm	2,64	5,02	7,62	15,28	17,28%	32,85%	49,87%
	12 pm a 1 pm	2,31	5,29	5,44	13,04	17,71%	40,57%	41,72%
	1 pm a 2 pm	3,06	5,78	3,52	12,36	24,76%	46,76%	28,48%
	2 pm a 3 pm	2,61	4,02	2,71	9,34	27,94%	43,04%	29,01%
	3 pm a 4 pm	3,03	4,89	2,61	10,53	28,77%	46,44%	24,79%
	4 pm a 5 pm	2,46	5,25	2,11	9,82	25,05%	53,46%	21,49%
	5 pm a 6 pm	2,63	5,73	1,44	9,8	26,84%	58,47%	14,69%
	6 pm a 7 pm	2,98	7,25	1,94	12,17	24,49%	59,57%	15,94%
	7 pm a 8 pm	2,5	7,2	3,09	12,79	19,55%	56,29%	24,16%
	8 pm a 9 pm	2,74	8,7	2,87	14,31	19,15%	60,80%	20,06%
	9 pm a 10 pm	1,62	6,05	1,45	9,12	17,76%	66,34%	15,90%
Promedio						21,08%	48,17%	30,76%
Desviación Estandar						4,76%	10,32%	12,62%

**Tabla 6.10** Análisis estadístico de la RBS El Cementerio CDMA

### Tráfico por Sector de la RBS El Cementerio (CDMA)



**Figura 6.6** Tendencia de tráfico de la estación CDMA El Cementerio

### 6.5.1.2. Estación base: La Urdaneta CDMA

Entre las 8 a.m. y las 3 p.m., el tráfico cursado por los 3 sectores es bastante similar. Después de este período, el sector 3 comienza experimentar una fuerte caída. De igual manera el sector 2 también experimenta un descenso en su ocupación, pero no con una pendiente tan pronunciada. Entre las 6 y las 9 de la noche, es cuando se observa la diferencia más grande entre el sector 1 y los sectores 2 y 3, y es en este lapso, cuando el sector 1 cursa la mayor cantidad de tráfico de todo el día. La radio base Urdaneta, al presentar variaciones estadísticas de 9 y hasta 15% por sector, entre en el grupo de candidata para la implementación de antenas inteligentes. (Figura 6.7 y Tabla 6.11)

Nombre de Radio Base	Hora	Tráfico Sector 1 (Erlangs)	Tráfico Sector 2 (Erlangs)	Tráfico Sector 3 (Erlangs)	Total Tráfico RBS (Erlangs)	% Tráfico Sector 1	% Tráfico Sector 2	% Tráfico Sector 3
La Urdaneta (CDMA)	8 am a 9 am	5,21	4,33	4,66	14,2	36,69%	30,49%	32,82%
	9 am a 10 am	6,74	5,38	4,64	16,76	40,21%	32,10%	27,68%
	10 am a 11 am	4,64	5,27	4,82	14,73	31,50%	35,78%	32,72%
	11 am a 12 pm	5,74	4,15	4,96	14,85	38,65%	27,95%	33,40%
	12 pm a 1 pm	4,46	3,73	4,74	12,93	34,49%	28,85%	36,66%
	1 pm a 2 pm	5,59	4,55	5,58	15,72	35,56%	28,94%	35,50%
	2 pm a 3 pm	5,04	5,29	4,87	15,2	33,16%	34,80%	32,04%
	3 pm a 4 pm	5,04	5,01	4,27	14,32	35,20%	34,99%	29,82%
	4 pm a 5 pm	5,57	5,55	3,51	14,63	38,07%	37,94%	23,99%
	5 pm a 6 pm	5,34	4,01	2,65	12	44,50%	33,42%	22,08%
	6 pm a 7 pm	8,25	1,98	2,02	12,25	67,35%	16,16%	16,49%
	7 pm a 8 pm	6,2	2,24	0,87	9,31	66,60%	24,06%	9,34%
	8 pm a 9 pm	7,76	1,95	0,96	10,67	72,73%	18,28%	9,00%
	Promedio					44,21%	29,52%	26,27%
	Desviación Estandar					14,51%	6,64%	9,48%

**Tabla 6.11** Análisis estadístico de la RBS CDMA La Urdaneta

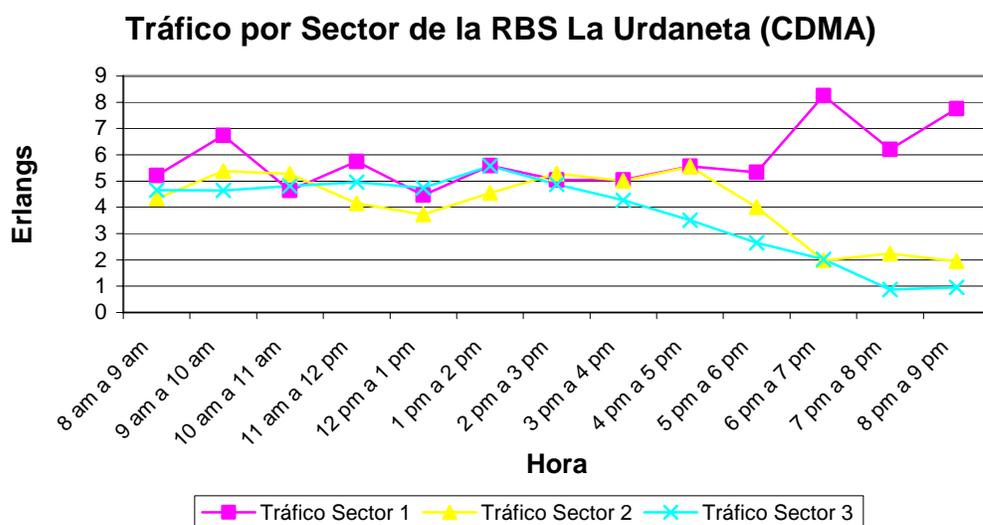


Figura 6.7 Tendencia de tráfico de la estación CDMA La Urdaneta.

### 6.5.1.3. Estación base: Los Cortijos CDMA

La Tabla 6.12 y la Figura 6.8 contienen la información de tráfico de la estación CDMA de los Cortijos.

Nombre de Radio Base	Hora	Tráfico Sector 1 (Erlangs)	Tráfico Sector 2 (Erlangs)	Tráfico Sector 3 (Erlangs)	Total Tráfico RBS (Erlangs)	% Tráfico Sector 1	% Tráfico Sector 2	% Tráfico Sector 3
Los Cortijos (CDMA)	7 am a 8 am	5,11	12,37	1,76	19,24	26,56%	64,29%	9,15%
	8 am a 9 am	5,33	15,09	1,93	22,35	23,85%	67,52%	8,64%
	9 am a 10 am	7,44	19,83	2,09	29,36	25,34%	67,54%	7,12%
	10 am a 11 am	9,05	19	3,27	31,32	28,90%	60,66%	10,44%
	11 am a 12 pm	7,68	15,26	3,36	26,3	29,20%	58,02%	12,78%
	12 pm a 1 pm	4,91	10,76	1,76	17,43	28,17%	61,73%	10,10%
	1 pm a 2 pm	5,9	14,15	1,74	21,79	27,08%	64,94%	7,99%
	2 pm a 3 pm	7,22	15,23	1,99	24,44	29,54%	62,32%	8,14%
	3 pm a 4 pm	7,04	15,69	3,36	26,09	26,98%	60,14%	12,88%
	4 pm a 5 pm	7,29	14,98	3,67	25,94	28,10%	57,75%	14,15%
	5 pm a 6 pm	4,15	8,51	1,56	14,22	29,18%	59,85%	10,97%
Promedio						27,54%	62,25%	10,21%
Desviación Estandar						1,79%	3,44%	2,29%

Tabla 6.12 Análisis estadístico de la RBS CDMA Los Cortijos

### Tráfico por Sector de la RBS Los Cortijos (CDMA)

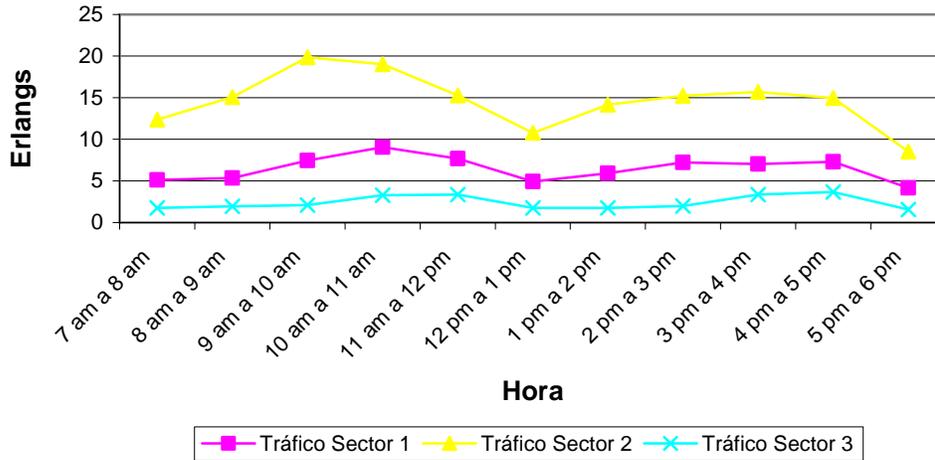


Figura 6.8 Tendencia de tráfico de la estación CDMA Los Cortijos.

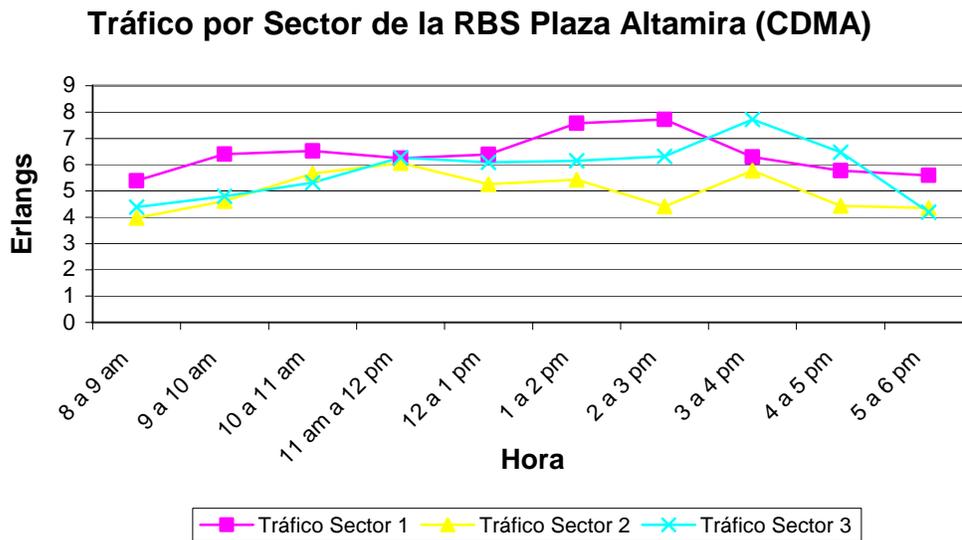
En la Figura 6.8 se observa como a lo largo del día se mantiene las proporciones del tráfico manejado por cada sector, y siempre se mantiene el mayor foco de tráfico en el sector 2. Debido al este comportamiento, la radio base Los Cortijos CDMA no requiere la implementación de antenas inteligentes.

#### 6.5.1.4. Estación base: Plaza Altamira CDMA

La estación CDMA de Plaza Altamira también entró en la clasificación de radio bases que no requieren antenas inteligentes. A pesar que el comportamiento no es tan estable como el caso de la estación los Cortijos, también se nota que se mantiene las proporciones de tráfico a lo largo del día. Tan solo se presentaron 2 lapsos de tiempo con comportamiento irregular, el primero de 11 a.m. a 12 p.m., donde los 3 sectores cursan prácticamente la misma cantidad de tráfico, y el período de 3 a 5 de la tarde, donde el sector sobrepasa en ocupación al sector 1 (Tabla 6.13 y Figura 6.9).

Nombre de Radio Base	Hora	Tráfico Sector 1 (Erlangs)	Tráfico Sector 2 (Erlangs)	Tráfico Sector 3 (Erlangs)	Total Tráfico RBS (Erlangs)	% Tráfico Sector 1	% Tráfico Sector 2	% Tráfico Sector 3
Plaza Altamira (CDMA)	8 a 9 am	5,39	3,97	4,39	13,75	39,20%	28,87%	31,93%
	9 a 10 am	6,4	4,61	4,79	15,8	40,51%	29,18%	30,32%
	10 a 11 am	6,52	5,67	5,31	17,5	37,26%	32,40%	30,34%
	11 am a 12 pm	6,25	6,07	6,27	18,59	33,62%	32,65%	33,73%
	12 a 1 pm	6,39	5,26	6,09	17,74	36,02%	29,65%	34,33%
	1 a 2 pm	7,58	5,43	6,15	19,16	39,56%	28,34%	32,10%
	2 a 3 pm	7,72	4,41	6,32	18,45	41,84%	23,90%	34,25%
	3 a 4 pm	6,29	5,78	7,72	19,79	31,78%	29,21%	39,01%
	4 a 5 pm	5,78	4,43	6,48	16,69	34,63%	26,54%	38,83%
5 a 6 pm	5,59	4,35	4,19	14,13	39,56%	30,79%	29,65%	
Promedio						37,40%	29,15%	33,45%
Desviación Estandar						3,29%	2,60%	3,32%

**Tabla 6.13** Análisis estadístico de la RBS CDMA Plaza Altamira



**Figura 6.9** Tendencia de tráfico de la estación CDMA de Plaza Altamira

## 7. CONCLUSIONES

En este trabajo especial de grado se llevó a cabo una revisión bibliográfica acerca del sistema de antenas inteligentes, se estudió la tecnología que existe actualmente en el mercado, se analizó el posible impacto que tendría en la red CDMA las antenas inteligentes, y por último se realizó un análisis estadístico de las radio bases del sistema. De todos los puntos considerados anteriormente se desprenden las siguientes conclusiones y recomendaciones:

Según el análisis de tráfico realizado a la red CDMA de Movilnet, apenas 33 radio bases de las 155 estudiadas (21%) presentan importantes variaciones en los porcentajes de ocupación de los sectores, a lo largo del día. Esto indica que la mayor parte de las estaciones poseen sectores con comportamiento estático en cuanto a los focos de tráfico, y por lo tanto, para al menos este aspecto, no se requeriría una implementación masiva de sistemas de antenas inteligentes para toda la red CDMA.

De las 33 radio bases CDMA que requieren la implementación de antenas inteligentes, 10 de ellas presentan también en la red TDMA fuertes variaciones en las relaciones de los porcentajes de tráfico de los sectores. Estas estaciones son las más susceptibles para la colocación de sistemas de antenas inteligentes.

Del análisis estadístico realizado a la red CDMA y TDMA se desprende que un grupo mayoritario de radio bases de ambos sistemas no presentan variaciones entre sectores en los focos de tráfico, y que por lo tanto no ameritan la instalación de antenas inteligentes. La instalación de este tipo de sistemas para las radio bases con variaciones en los focos de tráfico, no traería beneficios en cuanto a capacidad.

El sistema alojado de antenas inteligentes de Lucent Technologies representa una opción rápida y sencilla para la implementación de este tipo de tecnología. Por los momentos no podrá ser implementada porque aun no se tiene la versión de software #23, que es la que requiere para el sistema de antenas inteligentes. Las radio bases que soportan la tecnología son las MODCELL 4.0, y se debe reemplazar las tarjetas de canales y la tarjeta de pruebas y diagnósticos, aparte de configurar un arreglo de cuatro antenas para cada sector.

Una vez que se cumplan los requisitos para la implementación del sistema alojado de Lucent, se recomienda realizar una implementación de prueba, ya que se determinó que los procesos de llamada del sistema CDMA, acceso, voice, relevo y control de potencia, se pueden ver afectados negativamente con la instalación de las antenas inteligentes. En el momento de la implementación de prueba, se debe realizar sobre la radio base que posee el sistema de antenas inteligentes, un estudio estadístico de los parámetros de calidad del sistema, entre los que se incluyen el porcentaje de acceso al sistema, porcentaje de llamadas establecidas, y porcentaje de llamadas caídas. Se debe verificar que no se produzcan variaciones desfavorables en las estadísticas de estas métricas.

Con la información estadística que se obtendría de la prueba del sistema alojado de Lucent, se recomienda realizar un cálculo de la ganancia en cobertura y en capacidad obtenido con el sistema de antenas inteligentes, aspecto que va a permitir realizar un análisis financiero más preciso, y que justificaría o no la implementación de este tipo de solución.

Para la selección de las radio bases que requieren antenas inteligentes, aparte de llevar a cabo un análisis estadístico similar al presentado en este trabajo, también es necesario considerar la cantidad de tráfico total que maneja la radio base. Aquellas que cursan los valores más elevados de tráfico, son las que deben tener la prioridad más alta para la instalación de antenas inteligentes. Este aspecto, aparte de ofrecer beneficios en cuanto a capacidad para la red, también garantiza que en términos financieros se obtienen las más elevadas ganancias ante mínimos valores de inversión.

Aunque el mercado de la gran Caracas posee una muestra representativa de radio bases, se recomienda realizar el estudio presentado en este trabajo para todas las demás estaciones del sistema, para así determinar el total de antenas inteligentes que se requiere para la red CDMA de Movilnet. Esto permitiría tener una noción global de la inversión total requerida para el sistema.

## 8. REFERENCIAS

- [1]. LIBERTI, JOSEPH y RAPPAPORT, THEODORE. *Smart antennas for wireless communications. IS-95 and Third generation CDMA applications*, Prentice Hall PTR. Upper Saddle River, N.J., 1999, 377 p.
- [2]. BLOGH, J y HANZO, LAJOS. *Third generation systems and intelligent wireless networking: Smart antennas and adaptive modulation*. John Wiley & Sons, 2002, 432 p.
- [3]. JANASWAMY, RAMAKRISHNA y JANASWAMY, RAMAKRISHNAN. *Radiowave propagation and smart antennas for wireless communications*. Kluwer Academic Publishers, 2001, 336 p.
- [4]. RAPPAPORT, THEODORE. *Wireless communications: principles an practice*, Prentice Hall PTR. Upper Saddle River, N.J., 2001, 736 p.
- [5]. GARG, VIJAY. *IS-95 CDMA and CDMA 2000: Cellular/PCS Systems Implementation*. Prentice Hall PTR. Upper Saddle River, N.J., 1999, 422 p.
- [6]. STUTZMAN, WARREN y THIELE, GARY. *Antenna theory and Design*. Segunda Edición. John Wiley & Sons, 1998, 648 p.
- [7]. LEE, W. C. Y. *Mobile cellular telecommunications. Analog and digital systems*. Segunda Edición. McGraw-Hill, Inc, 1995.
- [8]. HUEMER, EDUARDO Y LENSING, KARL-HEINZ *Guía práctica de antenas. Kathrein Antennen Electronic*. Sexta Edición. 2000.
- [9]. *Special Issue on Smart antennas*. IEEE Personal Communications, Vol. 5, N. 1, Feb 1998.
- [10]. *Coverage Prediction for mobile radio systems operating in the 800/900 MHz frequency range*. IEEE transactions on vehicular technology, Vol. 37, N. 1, Feb 1998.
- [11]. BENNER, EDWARD y SESAY, ABU. *Effects of antenna height, antenna gain and pattern downtilting for cellular mobile radio*. IEEE transactions on vehicular technology, Vol. 45, N. 2, May 1996.
- [12]. THOMPSON, JOHN; GRANT, PETER y MULGREW, BERNARD. *Smart antenna arrays for CDMA Systems*. IEEE Personal Communications, Oct 1996.
- [13]. Lucent Technologies. *CDMA IS-95 and 3G1X Base Station Call Processing*. Student Guide. Lucent Learning.

- [14]. Lucent Technologies. *Introduction to 850-MHz Code Division Multiple Access (CDMA)*. Student Guide. Lucent Learning.
- [15]. Lucent Technologies. *RF Coverage, Capacity and Growth Engineering of CDMA Cellular (850 Mhz) Systems*. Student Guide. Lucent Learning.
- [16]. EMS Wireless. *806 Mhz – 906 Mhz Product Catalog*. 2001.
- [17]. CARROLL, DOUG. *CDMA BTS Roadmap – Modular Cell 4.0*. Lucent Technologies Conference, CEMUG 23. Feb 2003.
- [18]. POLAKOS, PAUL. *Intelligent Antennas and Blast for cdma 2000 Networks*. Lucent Technologies presentation to the CDG Technology Forum. Oct 2002.
- [19]. COCOZZA, EDUARDO. *Use of Smart Antennas in a Mixed CDMA2000 Voice and Data Enviroment*. Motorola presentation to Global Telecom Solutions Sector. Oct 2002.
- [20]. MARTINEZ\_MUÑOZ, ALEJANDRO. *Nortel Networks CDMA Advantages of AABS Smart Antenna Technology*. Nortel Networks presentation to CDG. Oct 2002.
- [21]. Metawave Communications Corporation. *Spotlight 2200 Smart Antenna Solutions*. Catálogo informativo. 2001.
- [22]. MENDEZ, DEBORAH. *Time for Carriers to get Smart..* Wireless Week. 19 de Febrero de 2001.
- [23]. OBSTLER, RACHEL. *From World War II to the World Wide Web: The Value of Smart Antenna Tecnology in Wireless Network*. Pacific Telecommunications Review. 2001.
- [24]. GORDON, SCOT. *Ready, Aim, Profit. Smart Antennas help CDMA operators target capacity Dollars*. PCS Systems & Technology. 2001.
- [25]. ALBRIGHT, PEGGY. *Smart Antennas find Time to Shine*. Wireless Week. 7 de Mayo de 2001.
- [26]. CDMA Development Group. *Smart Antennas*.  
<http://www.cdg.org/technology/cdma%5Ftechnology/smart%5Fantennas/index.asp>
- [27]. ArrayComm. *IntelliCell Whitepaper an IntelliCellBrochure*.  
<http://www.arraycomm.com/>
- [28]. Marconi Mobile. *Smart Antenas Systems*.  
<http://www.marconimobileaccess.com>

## 9. ANEXOS

### 9.1. Estudio Estadístico de CDMA

En la siguiente tabla se muestra los resultados obtenidos para las 155 radio bases, pertenecientes al sistema CDMA

Nombre	Red de Acceso	Número de Sectores	Tráfico Hora Pico	Lapso de Estudio	Desviación Estandar Sector 1	Desviación Estandar Sector 2	Desviación Estandar Sector 3	Más de 5Er/sec?	Aplica Antenas Inteligentes
Urdaneta	CDMA	3	16.76	8 am a 9 pm	14.51%	6.64%	9.48%	Si	Si
Cementerio	CDMA	3	17.34	7 am a 10 pm	4.76%	10.32%	12.62%	Si	Si
El Silencio	CDMA	3	19.78	8 am a 6 pm	5.39%	9.75%	5.42%	Si	Si
Nuevo Circo	CDMA	3	16.84	7 am a 10 pm	9.40%	4.67%	6.86%	Si	Si
El Valle	CDMA	3	18.56	7 am a 10 pm	6.11%	8.89%	5.83%	Si	Si
La Urbina	CDMA	3	21.11	8 am a 8 pm	8.14%	5.07%	4.51%	Si	Si
Palo Verde	CDMA	3	14.52	7 am a 10 pm	5.49%	6.50%	7.93%	Si	Si
Unimet	CDMA	2	13.99	8 am a 9 pm	7.80%	7.80%		Si	Si
Carrizal	CDMA	2	12.51	7 am a 10 pm	7.14%	7.14%		Si	Si
Centro Médico	CDMA	3	16.38	7 am a 9 pm	4.38%	7.07%	5.71%	Si	Si
Antimano	CDMA	3	19.1	7 am a 10 pm	6.14%	2.74%	6.90%	Si	Si
Guatire	CDMA	3	20.31	7 am a 9 pm	2.09%	5.87%	6.70%	Si	Si
Prado de María	CDMA	3	17.22	7 am a 10 pm	4.63%	3.77%	6.68%	Si	Si
Magallanes	CDMA	2	15.33	7 am a 10 pm	6.65%	6.65%		Si	Si
Los Angeles	CDMA	3	46.76	8 am a 8 pm	2.43%	6.54%	4.77%	Si	Si
Oripoto	CDMA	2	11.28	7 am a 10 pm	6.54%	6.54%		Si	Si
Caraballeda	CDMA	3	23.67	7 am a 10 pm	6.54%	5.88%	3.85%	Si	Si
Los Palos Grandes	CDMA	3	12.95	8 am a 7 pm	6.48%	6.48%		Si	Si
Av. San Martín	CDMA	3	16.19	7 am a 10 pm	4.22%	5.75%	6.30%	Si	Si
La Morita	CDMA	3	17.06	7 am a 10 pm	6.29%	6.11%	6.02%	Si	Si
Manzanares	CDMA	2	12.78	8 am a 9 pm	6.20%	6.20%		Si	Si
Campo Alegre	CDMA	3	15.92	7 am a 7 pm	4.36%	6.10%	2.38%	Si	Si
Cruz Roja	CDMA	3	17.91	8 am a 7 pm	5.97%	3.73%	3.93%	Si	Si
Casarapa	CDMA	2	15.81	7 am a 10 pm	5.95%	5.95%		Si	Si
Baralt Norte	CDMA	3	21.02	7 am a 10 pm	5.76%	5.11%	5.88%	Si	Si
Las Rosas	CDMA	3	16.88	7 am a 10 pm	5.63%	5.16%	5.86%	Si	Si
Caricuao	CDMA	3	23.26	7 am a 10 pm	4.97%	5.77%	1.79%	Si	Si
Cumbres de Curumo	CDMA	3	15.62	7 am a 10 pm	5.75%	4.15%	4.24%	Si	Si
Panamericana	CDMA	2	12.71	7 am a 10 pm	5.73%	5.73%		Si	Si
Las Mercedes	CDMA	3	42.85	8 am a 9 pm	3.47%	5.73%	3.92%	Si	Si
Madariaga	CDMA	2	11	7 am a 10 pm	5.63%	5.63%		Si	Si
Nueva Caracas	CDMA	3	24.24	8 am a 9 pm	4.43%	3.36%	5.56%	Si	Si
Higuerote	CDMA	3	15.19	7 am a 10 pm	2.13%	5.09%	5.52%	Si	Si
Los Rosales	CDMA	3	17.79	8 am a 9 pm	4.12%	3.08%	5.47%	Si	No
CADA Las Mercedes	CDMA	3	17.7	8 am a 6 pm	5.47%	4.77%	2.03%	Si	No
Capuchinos	CDMA	3	21.6	7 am a 10 pm	5.39%	4.75%	4.39%	Si	No
Guaicoco	CDMA	2	14.54	7 am a 10 pm	5.35%	5.35%		Si	No

Nombre	Red de Acceso	Número de Sectores	Tráfico Hora Pico	Lapso de Estudio	Desviación Estandar Sector 1	Desviación Estandar Sector 2	Desviación Estandar Sector 3	Más de 5Er/sec?	Aplica Antenas Inteligentes
Macarao	CDMA	3	24.43	7 am a 10 pm	4.86%	3.60%	5.28%	Si	No
La Urbina Sur	CDMA	3	13.47	7 am a 10 pm	5.24%	3.14%	5.04%	Si	No
Macuto	CDMA	2	12.38	7 am a 10 pm	5.09%	5.09%		Si	No
Catia	CDMA	3	19.19	9 am a 9 pm	4.63%	5.08%	1.89%	Si	No
Country Club	CDMA	3	14.6	7 am a 9 pm	5.07%	4.26%	2.56%	Si	No
Terrazas Club Hípico	CDMA	2	10.34	7 am a 10 pm	5.02%	5.02%		Si	No
CCS - La Guaira	CDMA	2	44.3	7 am a 10 pm	4.89%	4.89%		Si	No
Guarenas	CDMA	3	23.59	7 am a 10 pm	2.62%	4.66%	4.79%	Si	No
Los Chaguaramos	CDMA	3	18.93	7 am a 10 pm	3.88%	4.22%	4.78%	Si	No
Petare	CDMA	3	19.43	7 am a 10 pm	3.84%	2.49%	4.71%	Si	No
Coche	CDMA	3	20.8	7 am a 10 pm	3.72%	3.66%	4.66%	Si	No
Vial CCS-La Guaira	CDMA	2	18.24	7 am a 10 pm	4.65%	4.65%		Si	No
El Llanito	CDMA	2	15.56	7 am a 10 pm	4.65%	4.65%		Si	No
Puente Hierro	CDMA	3	14.97	7 am a 10 pm	4.39%	4.12%	4.64%	Si	No
Jardines del Valle	CDMA	3	27.55	7 am a 10 pm	3.18%	4.60%	4.62%	Si	No
Maiquetia	CDMA	2	36.02	8 am a 8 pm	4.58%	4.58%		Si	No
Pueblo Arriba	CDMA	2	10.36	7 am a 10 pm	4.56%	4.56%		Si	No
Mariperez	CDMA	3	19.09	8 am a 9 pm	4.46%	3.68%	3.41%	Si	No
Artigas	CDMA	3	23.94	7 am a 10 pm	4.12%	4.27%	4.39%	Si	No
Ruices Sur	CDMA	3	26.62	7 am a 7 pm	3.67%	4.36%	2.88%	Si	No
Catia La Mar	CDMA	3	23.77	7 am a 10 pm	1.87%	3.31%	4.35%	Si	No
Clínica Avila	CDMA	2	9.44	7 am a 6 pm	4.34%	4.34%		Si	No
La Boyera	CDMA	3	16.04	7 am a 10 pm	3.27%	4.27%	4.16%	Si	No
La Trinidad	CDMA	3	20.88	7 am a 10 pm	4.22%	2.95%	3.93%	Si	No
La Alameda	CDMA	2	11.66	7 am a 10 pm	4.19%	4.19%		Si	No
Plaza Venezuela	CDMA	3	21.27	8 am a 7 pm	2.98%	4.16%	3.32%	Si	No
Bello Monte	CDMA	3	17.45	7 am a 9 pm	3.45%	2.75%	4.06%	Si	No
Av. Casanova	CDMA	2	13.52	8 am a 6 pm	3.96%	3.96%		Si	No
Gato Negro	CDMA	2	12.05	7 am a 10 pm	3.93%	3.93%		Si	No
El Conde	CDMA	2	17.54	7 am a 7 pm	3.90%	3.90%		Si	No
El Rosal	CDMA	3	23.49	8 am a 7 pm	3.89%	3.14%	1.71%	Si	No
Quinta Crespo	CDMA	3	15.92	7 am a 10 pm	3.84%	3.79%	2.64%	Si	No
La Salle	CDMA	3	26.66	7 am a 10 pm	3.83%	3.83%	3.62%	Si	No
Pan de Azucar	CDMA	3	32.41	7 am a 10 pm	3.15%	3.44%	3.81%	Si	No
Prados del Este	CDMA	3	18.91	7 am a 10 pm	3.13%	2.73%	3.78%	Si	No
Charallave	CDMA	2	16.25	7 am a 10 pm	3.74%	3.74%		Si	No
Chacao	CDMA	3	28.7	7 am a 9 pm	2.45%	2.87%	3.73%	Si	No
El Marques	CDMA	3	20.44	8 am a 9 pm	3.68%	3.05%	1.74%	Si	No
Micro Caricuao	CDMA	2	25.89	7 am a 10 pm	3.65%	3.65%		Si	No
Banco Central	CDMA	3	25.22	8 am a 5 pm	2.94%	2.41%	3.60%	Si	No
La Vega	CDMA	3	31.96	7 am a 10 pm	3.32%	3.56%	1.96%	Si	No
Los Ruices	CDMA	3	25.4	7 am a 7 pm	3.21%	3.45%	2.47%	Si	No
Los Cortijos	CDMA	3	31.32	7 am a 6 pm	1.79%	3.44%	2.29%	Si	No
Montalban	CDMA	3	23.75	7 am a 10 pm	3.29%	1.79%	3.39%	Si	No
Guarenas Industrial	CDMA	3	22.17	7 am a 10 pm	2.93%	3.36%	2.83%	Si	No
Plaza Altamira	CDMA	3	19.79	8 am a 6 pm	3.29%	2.60%	3.32%	Si	No

Nombre	Red de Acceso	Número de Sectores	Tráfico Hora Pico	Lapso de Estudio	Desviación Estandar Sector 1	Desviación Estandar Sector 2	Desviación Estandar Sector 3	Más de 5Er/sec?	Aplica Antenas Inteligentes
Santa Cecilia	CDMA	3	14.07	8 am a 7 pm	2.60%	3.25%	1.78%	Si	No
Guaicaipuro	CDMA	2	24.13	8 am a 5 pm	3.15%	3.15%		Si	No
La Floresta	CDMA	3	38.77	8 am a 6 pm	3.14%	2.01%	2.81%	Si	No
La Pastora	CDMA	2	22.61	7 am a 10 pm	3.09%	3.09%		Si	No
Ciempies	CDMA	3	23.4	8 am a 7 pm	3.04%	3.08%	2.69%	Si	No
Boleita	CDMA	3	19.99	8 am a 5 pm	1.61%	2.97%	2.67%	Si	No
Los Caobos	CDMA	3	23.39	8 am a 8 pm	2.29%	2.93%	2.64%	Si	No
Las Tres Gracias	CDMA	3	16.03	8 am a 6 pm	2.27%	2.10%	2.83%	Si	No
Sabana Grande	CDMA	3	26.04	8 am a 7 pm	2.31%	2.70%	2.62%	Si	No
Av. Universidad	CDMA	3	26.94	8 am a 6 pm	2.09%	2.69%	1.62%	SI	No
El Paraiso	CDMA	3	13.89	*				No	No
La Candelaria	CDMA	3	13.79	*				No	No
San Bernardino	CDMA	3	13.72	*				No	No
Av. Venezuela	CDMA	3	12.94	*				No	No
La Castellana	CDMA	3	12.83	*				No	No
Bucare	CDMA	3	12.75	*				No	No
Bicentenario	CDMA	3	12.69	*				No	No
Colegio de Ingenieros	CDMA	3	12.66	*				No	No
San Antonio	CDMA	3	12.63	*				No	No
USM	CDMA	3	12.62	*				No	No
San Bernadino Norte	CDMA	3	12.4	*				No	No
El Bosque	CDMA	3	12.36	*				No	No
Poliedro	CDMA	3	12.25	*				No	No
Palos Grandes Norte	CDMA	3	11.74	*				No	No
La Yaguara	CDMA	3	11.09	*				No	No
La California	CDMA	3	10.99	*				No	No
Santa Clara	CDMA	3	10.57	*				No	No
Turumo	CDMA	3	10.49	*				No	No
Chuao	CDMA	3	10.11	*				No	No
Los Naranjos	CDMA	2	9.92	*				No	No
UCV	CDMA	2	9.8	*				No	No
Colinas de Tamanaco	CDMA	2	9.71	*				No	No
Tacarigua	CDMA	3	9.51	*				No	No
Club de Campo	CDMA	3	9.27	*				No	No
Macaracuay	CDMA	3	9.11	*				No	No
San Diego	CDMA	2	8.99	*				No	No
Urbina Industrial	CDMA	2	8.95	*				No	No
Valle Arriba	CDMA	2	8.72	*				No	No
La Mariposa	CDMA	3	8.66	*				No	No
Izcaragua	CDMA	2	8.49	*				No	No
El Cafetal	CDMA	3	8.22	*				No	No
El Marques Norte	CDMA	2	7.77	*				No	No
Buenaventura	CDMA	3	7.76	*				No	No
La Lagunita	CDMA	3	7.73	*				No	No
Observatorio	CDMA	2	7.62	*				No	No
Colinas de Bello M.	CDMA	2	7.52	*				No	No

Nombre	Red de Acceso	Número de Sectores	Tráfico Hora Pico	Lapso de Estudio	Desviación Estandar Sector 1	Desviación Estandar Sector 2	Desviación Estandar Sector 3	Más de 5Erl/sec?	Aplica Antenas Inteligentes
Caurimare	CDMA	3	7.43	*				No	No
Chacaito	CDMA	3	7.42	*				No	No
Santa Ines	CDMA	2	7.33	*				No	No
Av. Sucre	CDMA	2	7.29	*				No	No
Karimao	CDMA	3	7.11	*				No	No
Piedra Azul	CDMA	2	7.09	*				No	No
Sebucan	CDMA	3	6.71	*				No	No
La Guaira	CDMA	2	6.39	*				No	No
Boqueron	CDMA	3	6.13	*				No	No
Macaracuay Sur	CDMA	2	5.99	*				No	No
La Bonita	CDMA	2	5.84	*				No	No
Cumbre Azul	CDMA	3	5.41	*				No	No
Santa Paula	CDMA	2	5.12	*				No	No
Naiguata	CDMA	2	3.64	*				No	No
Aeropuerto CCS	CDMA	2	3.27	*				No	No
El Guapo	CDMA	3	2.63	*				No	No
Mariperez Norte	CDMA	2	2.62	*				No	No
Junquito	CDMA	2	2.58	*				No	No
San Luis	CDMA	2	2.58	*				No	No
Cúpira	CDMA	3	1.78	*				No	No
Pare-Stop	CDMA	2	1.56	*				No	No
El Clavo	CDMA	2	1.15	*				No	No
Geremba	CDMA	2	1.14	*				No	No
Kempis	CDMA	2	0.93	*				No	No
Tapipa	CDMA	2	0.93	*				No	No
Alto Prado	CDMA	2	0.582	*				No	No

\* No se seleccionó lapso de estudio, debido a que el tráfico cursado por la radio base no era representativo.

## 9.2. Estudio Estadístico de TDMA

En la siguiente tabla se muestra los resultados obtenidos para las 155 radio bases, pertenecientes al sistema TDMA.

Nombre	Red de Acceso	Número de Sectores	Tráfico Hora Pico	Lapso de Estudio	Desviación Estandar Sector 1	Desviación Estandar Sector 2	Desviación Estandar Sector 3	Más de 5Erl/sec?	Aplica Antenas Inteligentes
Cementerio	TDMA	3	34.5	7 am a 9 pm	5.08%	7.10%	11.25%	Si	Si
Antimano	TDMA	3	32.6	7 am a 10 pm	9.69%	7.02%	2.99%	Si	Si
Guaicoco	TDMA	2	17.2	7 am a 10 pm	9.49%	9.49%		Si	Si
El Valle	TDMA	3	49.5	7 am a 10 pm	4.47%	8.27%	5.26%	Si	Si
La Urbina Sur	TDMA	3	38.1	7 am a 10 pm	7.97%	7.12%	2.72%	Si	Si
La Urbina	TDMA	3	29.2	7 am a 8 pm	7.50%	7.45%	2.46%	Si	Si
La Yaguara	TDMA	3	32.5	8 am a 8 pm	5.43%	2.55%	7.44%	Si	Si
El Rosal	TDMA	3	42.1	8 am a 8 pm	6.90%	7.02%	2.91%	Si	Si
Macaracuay	TDMA	3	17.8	8 am a 9 pm	7.00%	3.87%	6.50%	Si	Si
Los Palos Grandes	TDMA	2	16.8	7 am a 7 pm	7.00%	7.00%		Si	Si
Oripoto	TDMA	2	11.6	7 am a 10 pm	6.93%	6.93%		Si	Si

Nombre	Red de Acceso	Número de Sectores	Tráfico Hora Pico	Lapso de Estudio	Desviación Estandar Sector 1	Desviación Estandar Sector 2	Desviación Estandar Sector 3	Más de 5Erl/sec?	Aplica Antenas Inteligentes
Baralt Norte	TDMA	3	25.9	7 am a 10 pm	4.03%	6.72%	4.31%	Si	Si
Ciempies	TDMA	3	33	7 am a 7 pm	4.47%	6.67%	3.97%	Si	Si
Pueblo Arriba	TDMA	2	24.8	7 am a 10 pm	6.52%	6.52%		Si	Si
La California	TDMA	3	46.7	7 am a 10 pm	4.70%	2.72%	6.43%	Si	Si
Alto Prado	TDMA	2	12.3	7 am a 10 pm	6.25%	6.25%		Si	Si
Santa Clara	TDMA	3	20.1	8 am a 9 pm	6.24%	3.37%	4.46%	Si	Si
Los Angeles	TDMA	3	49.8	8 am a 9 pm	6.23%	4.22%	3.81%	Si	Si
Poliedro	TDMA	2	25.1	7 am a 7 pm	5.96%	5.96%		Si	Si
Santa Ines	TDMA	2	17	7 am a 10 pm	5.95%	5.95%		Si	Si
Los Ruices	TDMA	3	43.2	8 am a 6 pm	4.48%	5.85%	2.58%	Si	Si
Terrazas Club Hípico	TDMA	2	13.7	7 am a 10 pm	5.43%	5.43%		Si	No
La Bonita	TDMA	2	13.7	7 am a 10 pm	5.40%	5.40%		Si	No
San Bernardino	TDMA	3	24.8	8 am a 6 pm	3.81%	2.80%	5.36%	Si	No
Manzanares	TDMA	2	18.7	8 am a 6 pm	5.36%	5.36%		Si	No
Vial CCS-La Guaira	TDMA	2	21.7	8 am a 6 pm	5.35%	5.35%		Si	No
El Silencio	TDMA	3	56.6	8 am a 6 pm	4.54%	5.33%	4.21%	Si	No
La Morita	TDMA	3	15.7	8 am a 6 pm	2.96%	4.92%	5.24%	Si	No
Chua	TDMA	3	27.9	7 am a 7 pm	3.43%	4.56%	4.66%	Si	No
Buenaventura	TDMA	2	22.2	8 am a 6 pm	5.07%	5.07%		Si	No
Unimet	TDMA	2	16.6	8 am a 6 pm	4.96%	4.96%		Si	No
El Marques	TDMA	3	40.2	8 am a 6 pm	3.30%	4.96%	2.43%	Si	No
Las Mercedes	TDMA	3	58.6	8 am a 6 pm	3.60%	4.92%	3.27%	Si	No
Av. San Martin	TDMA	3	35.9	8 am a 6 pm	2.39%	4.47%	4.91%	Si	No
Campo Alegre	TDMA	3	26.5	8 am a 6 pm	4.87%	4.58%	2.48%	Si	No
Bucare	TDMA	3	23	8 am a 6 pm	4.48%	4.83%	2.73%	Si	No
Catía	TDMA	3	59.7	8 am a 6 pm	4.81%	1.78%	3.71%	Si	No
El Llanito	TDMA	2	25.7	8 am a 6 pm	4.77%	4.77%		Si	No
CCS - La Guaira	TDMA	3	67.5	8 am a 6 pm	4.77%	3.51%	2.41%	Si	No
San Bernadino Norte	TDMA	3	39.7	8 am a 6 pm	2.56%	4.51%	4.22%	Si	No
Boleita	TDMA	3	50.6	8 am a 6 pm	4.30%	2.06%	4.49%	Si	No
Guatire	TDMA	3	48.9	8 am a 6 pm	1.75%	4.48%	3.12%	Si	No
Urbina Industrial	TDMA	2	14.5	8 am a 6 pm	4.45%	4.45%		Si	No
Cumbres de Curumo	TDMA	2	12.1	8 am a 6 pm	4.45%	4.45%		Si	No
La Pastora	TDMA	2	16.5	8 am a 6 pm	4.41%	4.41%		Si	No
La Trinidad	TDMA	3	54	8 am a 6 pm	1.49%	4.40%	3.54%	Si	No
San Antonio	TDMA	3	17.8	8 am a 6 pm	1.01%	4.37%	4.40%	Si	No
Santa Cecilia	TDMA	3	15	8 am a 6 pm	4.40%	3.70%	2.08%	Si	No
La Candelaria	TDMA	3	42.8	8 am a 6 pm	4.39%	1.99%	4.08%	Si	No
La Mariposa	TDMA	2	16.4	8 am a 6 pm	4.38%	4.38%		Si	No
Casarapa	TDMA	2	21.9	8 am a 6 pm	4.37%	4.37%		Si	No
CADA Las Mercedes	TDMA	3	16	8 am a 6 pm	3.07%	4.33%	3.77%	Si	No
Mariperez	TDMA	3	23.2	8 am a 6 pm	4.32%	4.09%	3.96%	Si	No
Caurimare	TDMA	3	16.6	8 am a 6 pm	3.93%	4.31%	3.51%	Si	No
Pan de Azucar	TDMA	3	45.8	8 am a 6 pm	1.39%	3.34%	4.27%	Si	No
Los Chaguaramos	TDMA	3	27.9	8 am a 6 pm	2.92%	4.23%	2.84%	Si	No
Urdaneta	TDMA	3	40.3	8 am a 6 pm	4.21%	3.34%	2.95%	Si	No

Nombre	Red de Acceso	Número de Sectores	Tráfico Hora Pico	Lapso de Estudio	Desviación Estandar Sector 1	Desviación Estandar Sector 2	Desviación Estandar Sector 3	Más de 5Erl/sec?	Aplica Antenas Inteligentes
Colegio de Ingenieros	TDMA	3	34.7	8 am a 6 pm	2.74%	1.74%	4.19%	Si	No
Puente Hierro	TDMA	3	20.2	8 am a 6 pm	3.47%	4.17%	2.24%	Si	No
Montalban	TDMA	3	57.6	8 am a 6 pm	1.81%	3.61%	4.15%	Si	No
Capuchinos	TDMA	3	28.6	8 am a 6 pm	4.13%	3.07%	2.46%	Si	No
El Marques Norte	TDMA	2	13.4	8 am a 6 pm	4.13%	4.13%		Si	No
La Alameda	TDMA	2	15	8 am a 6 pm	4.12%	4.12%		Si	No
Prado de María	TDMA	3	29.2	8 am a 6 pm	3.29%	4.12%	3.94%	Si	No
Av. Casanova	TDMA	2	18.9	8 am a 6 pm	4.11%	4.11%		Si	No
Palo Verde	TDMA	3	21.2	8 am a 6 pm	4.01%	3.69%	3.23%	Si	No
Carrizal	TDMA	2	18.1	8 am a 6 pm	4.01%	4.01%		Si	No
Quinta Crespo	TDMA	3	44.8	8 am a 6 pm	2.61%	4.01%	2.82%	Si	No
Panamericana	TDMA	2	14.7	8 am a 6 pm	3.97%	3.97%		Si	No
Av. Venezuela	TDMA	3	26.6	8 am a 6 pm	3.71%	1.04%	3.94%	Si	No
Los Rosales	TDMA	3	48.7	8 am a 6 pm	2.50%	3.13%	3.92%	Si	No
Country Club	TDMA	3	18.5	8 am a 6 pm	3.03%	3.88%	3.36%	Si	No
La Floresta	TDMA	3	60.9	8 am a 6 pm	3.85%	3.33%	1.86%	Si	No
Av. Sucre	TDMA	2	20.4	8 am a 6 pm	3.83%	3.83%		Si	No
Caricuao	TDMA	3	35.9	8 am a 6 pm	3.66%	3.83%	1.03%	Si	No
Valle Arriba	TDMA	2	12.5	8 am a 6 pm	3.76%	3.76%		Si	No
Magallanes	TDMA	2	25.4	8 am a 6 pm	3.75%	3.75%		Si	No
USM	TDMA	3	20.5	8 am a 6 pm	1.31%	3.25%	3.74%	Si	No
Caraballeda	TDMA	2	16.3	8 am a 6 pm	3.73%	3.73%		Si	No
Palos Grandes Norte	TDMA	2	10.8	8 am a 6 pm	3.70%	3.70%		Si	No
La Castellana	TDMA	3	21.7	8 am a 6 pm	3.47%	3.37%	3.65%	Si	No
Los Naranjos	TDMA	2	11.2	8 am a 6 pm	3.64%	3.64%		Si	No
Cruz Roja	TDMA	3	30.62	8 am a 6 pm	3.59%	3.31%	3.57%	Si	No
La Salle	TDMA	3	42.8	8 am a 6 pm	3.57%	2.31%	1.90%	Si	No
El Bosque	TDMA	3	39.8	8 am a 6 pm	2.52%	3.53%	3.19%	Si	No
Las Rosas	TDMA	2	20.1	8 am a 6 pm	3.53%	3.53%		Si	No
Guarenas	TDMA	3	54.2	8 am a 6 pm	0.87%	3.49%	3.52%	Si	No
Chacaito	TDMA	3	29.2	8 am a 6 pm	3.03%	1.98%	3.51%	Si	No
Observatorio	TDMA	2	17.3	8 am a 6 pm	3.50%	3.50%		Si	No
UCV	TDMA	2	47.4	8 am a 6 pm	3.49%	3.49%		Si	No
Petare	TDMA	3	38.8	8 am a 6 pm	3.45%	3.05%	2.75%	Si	No
Sebucan	TDMA	3	17.9	8 am a 6 pm	3.42%	3.27%	2.42%	Si	No
Artigas	TDMA	3	49.9	8 am a 6 pm	2.68%	1.75%	3.40%	Si	No
Maiquetia	TDMA	2	71.1	8 am a 6 pm	3.38%	3.38%		Si	No
Macuto	TDMA	2	21.6	8 am a 6 pm	3.34%	3.34%		Si	No
Sabana Grande	TDMA	3	46.8	8 am a 6 pm	2.08%	3.01%	3.32%	Si	No
La Boyera	TDMA	3	28.8	8 am a 6 pm	2.81%	3.30%	3.11%	Si	No
Macarao	TDMA	3	30.3	8 am a 6 pm	2.79%	1.65%	3.24%	Si	No
Centro Médico	TDMA	3	31.8	8 am a 6 pm	3.24%	3.16%	3.10%	Si	No
Los Cortijos	TDMA	3	47.6	8 am a 6 pm	1.62%	3.23%	3.14%	Si	No
Plaza Altamira	TDMA	3	35.7	8 am a 6 pm	2.82%	2.33%	3.23%	Si	No
Coche	TDMA	3	50.7	8 am a 6 pm	2.78%	3.21%	2.60%	Si	No
Av. Universidad	TDMA	3	51.7	8 am a 6 pm	2.35%	3.19%	2.11%	Si	No

Nombre	Red de Acceso	Número de Sectores	Tráfico Hora Pico	Lapso de Estudio	Desviación Estandar Sector 1	Desviación Estandar Sector 2	Desviación Estandar Sector 3	Más de 5Erl/sec?	Aplica Antenas Inteligentes
Guacaipuro	TDMA	2	19.5	8 am a 6 pm	3.16%	3.16%		Si	No
Jardines del Valle	TDMA	3	39.9	8 am a 6 pm	2.58%	3.14%	3.15%	Si	No
Nuevo Circo	TDMA	3	40.1	8 am a 6 pm	1.57%	2.28%	3.09%	Si	No
Madariaga	TDMA	2	24.9	8 am a 6 pm	3.03%	3.03%		Si	No
Bicentenario	TDMA	2	15.2	8 am a 6 pm	3.02%	3.02%		Si	No
La Vega	TDMA	2	27.4	8 am a 6 pm	3.02%	3.02%		Si	No
Chacao	TDMA	3	36	8 am a 6 pm	2.18%	2.97%	2.68%	Si	No
Prados del Este	TDMA	3	40.3	8 am a 6 pm	2.94%	2.93%	2.23%	Si	No
Los Caobos	TDMA	3	59.1	8 am a 6 pm	1.13%	2.89%	2.71%	Si	No
El Paraiso	TDMA	3	31.2	8 am a 6 pm	2.53%	2.67%	2.88%	Si	No
Nueva Caracas	TDMA	3	69.1	8 am a 6 pm	2.72%	2.77%	1.06%	Si	No
Micro Caricuao	TDMA	2	37.2	8 am a 6 pm	2.68%	2.68%		Si	No
Clínica Avila	TDMA	2	19.6	8 am a 6 pm	2.60%	2.60%		Si	No
Ruices Sur	TDMA	3	36.6	8 am a 6 pm	2.59%	1.95%	1.96%	Si	No
Gato Negro	TDMA	2	36.3	8 am a 6 pm	2.58%	2.58%		Si	No
Plaza Venezuela	TDMA	3	41.1	8 am a 6 pm	1.58%	2.15%	2.57%	Si	No
Catía La Mar	TDMA	3	43.3	8 am a 6 pm	2.12%	1.62%	2.56%	Si	No
Banco Central	TDMA	3	38.5	8 am a 6 pm	2.38%	1.98%	2.27%	Si	No
Charallave	TDMA	2	32.2	8 am a 6 pm	2.27%	2.27%		Si	No
El Conde	TDMA	2	29.8	8 am a 6 pm	2.15%	2.15%		Si	No
Bello Monte	TDMA	3	29.9	8 am a 6 pm	2.13%	1.99%	1.97%	Si	No
Las Tres Gracias	TDMA	3	34.9	8 am a 6 pm	1.74%	1.37%	1.34%	Si	No
Higuerote	TDMA	2	22.5	7 am a 10 pm	1.56%	1.56%		Si	No
Turumo	TDMA	3	14.7	*				No	No
El Cafetal	TDMA	3	14.3	*				No	No
La Guaira	TDMA	3	13.6	*				No	No
Tacarigua	TDMA	3	12.7	*				No	No
Boqueron	TDMA	3	11.3	*				No	No
Karimao	TDMA	3	10.5	*				No	No
Cumbre Azul	TDMA	3	10	*				No	No
Santa Paula	TDMA	2	9.6	*				No	No
Colinas de Bello M.	TDMA	2	9.5	*				No	No
San Diego	TDMA	2	9.3	*				No	No
Naiquata	TDMA	2	9	*				No	No
Club de Campo	TDMA	2	8.9	*				No	No
Izcaragua	TDMA	2	8.7	*				No	No
Macaracuay Sur	TDMA	2	8.6	*				No	No
Colinas de Tamanaco	TDMA	2	8.3	*				No	No
Piedra Azul	TDMA	2	8.2	*				No	No
La Lagunita	TDMA	3	7.3	*				No	No
Aeropuerto CCS	TDMA	2	6.4	*				No	No
El Guapo	TDMA	3	6.3	*				No	No
Guarenas Industrial	TDMA	3	5.9	*				No	No
Mariperez Norte	TDMA	2	5.1	*				No	No
Cúpira	TDMA	2	4.6	*				No	No
San Luis	TDMA	2	4.5	*				No	No

Nombre	Red de Acceso	Número de Sectores	Tráfico Hora Pico	Lapso de Estudio	Desviación Estandar Sector 1	Desviación Estandar Sector 2	Desviación Estandar Sector 3	Más de 5Erl/sec?	Aplica Antenas Inteligentes
Junquito	TDMA	2	3.4	*				No	No
El Clavo	TDMA	2	3.2	*				No	No
Tapipa	TDMA	2	2.8	*				No	No
Kempis	TDMA	2	2.1	*				No	No
Geremba	TDMA	2	1.9	*				No	No
Pare-Stop	TDMA	2	1.4	*				No	No

\* No se seleccionó lapso de estudio, debido a que el tráfico cursado por la radio base no era representativo.