

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED WLAN MULTICELDA “OUTDOOR” CON  
SOPORTE PARA 802.11e**



**CHRISTIAN BENAVIDES MARTINEZ  
JAVIER ANDRES GOMEZ ORDOÑEZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
GRUPO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES  
POPAYÁN  
2007**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED WLAN MULTICELDA “OUTDOOR” CON  
SOPORTE PARA 802.11e**

**CHRISTIAN BENAVIDES MARTINEZ  
JAVIER ANDRES GOMEZ ORDOÑEZ**

Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en  
Electrónica y Telecomunicaciones

**Director  
Ing. GUEFRY AGREDO MÉNDEZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
GRUPO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES  
POPAYÁN  
2007**

Raúl, Graciela y Diana:  
El triunfo de alguno de nosotros es el triunfo de los cuatro.  
He aquí un triunfo.  
Javier

Al tiempo inusitado...  
A las cosas que aun no existen...  
A los caminos que no he frecuentado...  
A los recuerdos que no he adquirido...  
A los momentos que no he malogrado...  
A los que me enseñaron que la sabiduría  
llega cuando ya no sirve para nada...  
A los que continúan haciendo que mi vida  
sea más que un breve espacio...  
A los ojos...  
¡A quien sino!  
Steve B.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1. PRINCIPIOS DE DISEÑO DE TECNOLOGÍAS RELACIONADAS</b>	<b>4</b>
1.1 VoIP	4
1.2 CÓDECS	6
1.3 PROTOCOLOS Y ESTÁNDARES RELACIONADOS CON VoIP	10
1.3.1 PROTOCOLOS DE SEÑALIZACIÓN	10
1.3.1.1 H.323	10
1.3.1.2 SIP	11
1.3.1.3 MGCP/Megaco	13
1.3.2 PROTOCOLOS DE TRANSPORTE	13
1.3.2.1 RTP	13
1.3.2.2 RTCP	15
1.4 TELEFONÍA CELULAR	16
1.4.1 REUTILIZACIÓN DE FRECUENCIA Y DIVISIÓN EN CELDAS	17
1.4.2 FACTOR DE REDUCCIÓN DE INTERFERENCIA CO-CANAL	18
1.4.3 DISTANCIA DE REUTILIZACIÓN DE FRECUENCIA	19
1.4.4 CELDAS CON CANALES IGUALES	20
1.4.5 TIPOS DE CELDA	20
1.4.6 RADIO DE CELDA	21
1.4.7 ASIGNACIÓN DE CANALES	21
1.4.8 UTILIZACIÓN DEL ESPECTRO DE FRECUENCIA	21
1.5 WI-FI	22
1.5.1 ARQUITECTURA IEEE 802.11	23
1.5.2 IEEE 802.11	24
1.5.3 IEEE 802.11B	25
1.5.4 IEEE 802.11A	25
1.5.5 IEEE 802.11G	26
<b>2. DIMENSIONAMIENTO DE VOIP SOBRE WLAN CON SOPORTE PARA 802.11E</b>	<b>28</b>
2.1 DEFINICIÓN DE CALIDAD DE SERVICIO	28
2.2 ESTÁNDARES IEEE 802.11 Y 802.11E	30
2.2.1 ESTÁNDAR IEEE 802.11 NIVEL MAC	30
2.2.1.1 Las funciones de coordinación de 802.11: DCF y PCF	31
2.2.1.2 Limitaciones de calidad de servicio en DCF y PCF	32
2.2.2 ESTÁNDAR IEEE 802.11E	33
2.2.2.1 Provisión de QoS	33
2.2.3 FLUJOS DE TRÁFICO	33
2.2.3.1 Generación de un flujo de tráfico	33
2.2.3.2 Especificación de tráfico de un TS	34
2.2.4 MODIFICACIÓN DE LAS FUNCIONES DE ACCESO	34
2.2.4.1 Acceso al Canal Distribuido Mejorado (EDCA)	34
2.2.4.2 Acceso controlado al canal HCF (HCCA)	36
2.3 CONSUMO DE ANCHO DE BANDA POR LLAMADA VoIP	40

2.3.1	CÁLCULO DEL NÚMERO DE SESIONES VOIP	43
-------	-------------------------------------	----

### **3. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS WLAN MULTICELDA EN UN ENTORNO *OUTDOOR*** **47**

<b>3.1</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DE ENTORNOS INDOOR Y OUTDOOR</b>	<b>47</b>
3.1.1	ENTORNOS <i>INDOOR</i>	47
3.1.2	ENTORNOS <i>OUTDOOR</i>	48
3.1.2.1	Problemas típicos en el despliegue de redes WLAN en entornos <i>outdoor</i>	49
3.1.2.2	Problema del nodo oculto	49
3.1.2.3	Problema del nodo expuesto	50
3.1.2.4	Distancia del trayecto de propagación	50
3.1.2.5	Desvanecimiento por multi-trayecto	51
3.1.2.6	Línea de vista (LOS)	51
<b>3.2</b>	<b>CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE REDES WLAN MULTICELDA OUTDOOR</b>	<b>52</b>
3.2.1	CRITERIOS DE CAPACIDAD	52
3.2.1.1	Número de canales disponibles	53
3.2.1.2	Distancia de re-uso de frecuencia	55
3.2.1.3	Radio de cobertura de la celda	56
3.2.1.4	Sectorización en redes WLAN multicelda <i>outdoor</i>	58
<b>3.3</b>	<b>CRITERIOS DE COBERTURA</b>	<b>59</b>
3.3.1	MODELOS DE COBERTURA	60
3.3.2	MODELOS BIDIMENSIONALES	60
3.3.2.1	Modelo Okumura-Hata	60
3.3.2.2	Modelo Walfish-Bertoni	61
3.3.2.3	Modelo COST231-Walfish-Ikegami	62
<b>3.4</b>	<b>CRITERIOS DE CALIDAD</b>	<b>64</b>
3.4.1	SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE NODO OCULTO Y NODO EXPUESTO	64
3.4.2	ELECCIÓN DEL <i>CÓDEC</i>	65
<b>3.5</b>	<b>GUÍA DE IMPLEMENTACIÓN DE REDES WLAN MULTICELDA OUTDOOR CON SOPORTE 802.11E</b>	<b>65</b>
3.5.1	IDENTIFICAR LOS REQUERIMIENTOS BÁSICOS DE LOS POSIBLES ENLACES INALÁMBRICOS	66
3.5.2	REALIZAR UN ESTUDIO DEL ENTORNO	66
3.5.3	PLANEAR LA CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE WLAN	66
3.5.4	ELECCIÓN DE EQUIPOS	66

### **4. DISEÑO DE UNA RED WLAN MULTICELDA EN ENTORNOS OUTDOOR** **68**

<b>4.1</b>	<b>DEFINICIÓN DE PARÁMETROS METODOLÓGICOS</b>	<b>68</b>
4.1.1	FORMULACIÓN DE LOS OBJETIVOS	68
4.1.2	ESTABLECIMIENTO DE PREMISAS	69
4.1.3	DETERMINACIÓN DE ALTERNATIVAS	70
4.1.4	EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS	70
<b>4.2</b>	<b>PARÁMETROS TÉCNICOS</b>	<b>70</b>
4.2.1	CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS WLAN	71
4.2.1.1	Radio de Cobertura por Celda	71
4.2.1.2	Planeación de frecuencias y tamaño del <i>cluster</i>	71
4.2.1.3	Cálculo de la distancia de re-uso y localización espacial de las celdas co-canal	72
4.2.1.4	Potencias de transmisión	73

4.2.1.5	Elección del <i>códec</i>	73
4.2.2	IDENTIFICACIÓN DE EQUIPOS	73
4.2.2.1	Análisis a nivel de sector	73
4.2.2.2	Análisis a nivel de celda	73
4.2.2.3	Análisis a nivel multicelda	74
<b>4.3</b>	<b>PROPUESTA DE DISEÑO FINAL</b>	<b>77</b>

## **5. SIMULACIÓN A NIVEL DE SISTEMA DEL DISEÑO FINAL CON NCTUNS 3.0** **78**

<b>5.1</b>	<b>NECESIDAD DE SIMULADORES</b>	<b>78</b>
<b>5.2</b>	<b>VENTAJAS DE LOS SIMULADORES</b>	<b>78</b>
<b>5.3</b>	<b>SIMULACIÓN</b>	<b>79</b>
5.3.1	TIPOS DE SIMULACIÓN	80
<b>5.4</b>	<b>METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN</b>	<b>80</b>
5.4.1	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	81
5.4.2	DISEÑO DE ESTUDIO	81
5.4.2.1	NS-2	82
5.4.2.2	Opnet IT Guru Academia Edition	82
5.4.2.3	NCTUns 3.0	83
5.4.3	DISEÑO DEL MODELO CONCEPTUAL	85
5.4.4	FORMULACIÓN DE ENTRADAS, SUPOSICIONES, DEFINICIÓN Y VALIDACIÓN DE PROCESOS	86
5.4.4.1	Escenario 1: Análisis a nivel de una celda	89
5.4.4.2	Escenario 2: Análisis a nivel multicelda	90
5.4.4.3	Escenario 3: Análisis a nivel de una celda con tráfico de voz y datos	91
5.4.5	EXPERIMENTACIÓN CON EL MODELO DE SIMULACIÓN	92
5.4.5.1	Análisis de Resultados	92
5.4.5.2	Resumen de resultados y validación del diseño propuesto.	106

## **6. CONCLUSIONES** **108**

## **7. RECOMENDACIONES** **110**

## **8. REFERENCIAS** **111**

### **ANEXOS**

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> <i>CÓDEC G.711</i>	7
<b>FIGURA 2.</b> COMPRESIÓN DE VOZ CON G.729. LA CADENA DE VOZ ANALÓGICA ES DIGITALIZADA EN TRAMAS PCM, Y ASÍ MISMO ENTREGADAS AL ALGORITMO DE COMPRESIÓN EN INTERVALOS DE 10 MS.	8
<b>FIGURA 3.</b> <i>CÓDEC G.729.</i>	8
<b>FIGURA 4.</b> INTERCAMBIO DE PRIMITIVAS ENTRE DOS EQUIPOS EN LA RED DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA.	12
<b>FIGURA 5.</b> ENCABEZADO RTP	15
<b>FIGURA 6.</b> RE-USO DE FRECUENCIAS.	17
<b>FIGURA 7.</b> A) CELDAS AMORFAS. B) CELDAS FORMADAS CON ANTENAS ISOTRÓPICAS. C) EJEMPLO DE <i>CLUSTER</i> CON $K = 7$	18
<b>FIGURA 8.</b> PATRÓN DE RE-USO CON $N$ CELDAS.	19
<b>FIGURA 9.</b> RELACIÓN FRENTE-ESPALDA PARA CANALES ADYACENTES	22
<b>FIGURA 10.</b> MODELO GENERAL DE CALIDAD DE SERVICIO.	29
<b>FIGURA 11.</b> ARQUITECTURA MAC ESTÁNDAR 802.11.	30
<b>FIGURA 12.</b> ARQUITECTURA MAC ESTÁNDAR 802.11E.	34
<b>FIGURA 13.</b> ENCABEZADO MAC QOS DE UNA TRAMA DE DATOS	37
<b>FIGURA 14.</b> A) TRANSMISIÓN DE DATOS SIN HACER USO DE CFB. EN ESTE CASO UNA VEZ LA ESTACIÓN HAYA RECIBIDO UN ACK DEL PAQUETE INMEDIATAMENTE ANTERIOR VUELVE A COMPETIR POR ACCEDER EL MEDIO ESPERANDO UN DIFS MÁS UN TIEMPO DE <i>BACKOFF</i> . B) MEDIANTE EL USO DE CFB UN CLIENTE PUEDE TRANSMITIR MÚLTIPLES TRAMAS SIN LA NECESIDAD DE GENERAR UN DIFS MÁS UN TIEMPO DE <i>BACKOFF</i> DESPUÉS DE RECIBIR UN ACK.	38
<b>FIGURA 15.</b> APLICACIÓN DEL PROTOCOLO DE ENLACE DIRECTO	39
<b>FIGURA 16.</b> ENCAPSULAMIENTO DE VOIP IPV4 E IPV6	43
<b>FIGURA 17.</b> TIEMPOS EN 802.11E REQUERIDOS PARA UNA TRANSMISIÓN EXITOSA	44
<b>FIGURA 18.</b> RED <i>INDOOR</i>	48
<b>FIGURA 19.</b> USO DE PUNTOS DE ACCESO EN CADA CELDA SIN PREVIA PLANEACIÓN.	50
<b>FIGURA 20.</b> EL PUNTO DE ACCESO SE ENCUENTRA DENTRO DEL RANGO DE COBERTURA DE LAS TRES ESTACIONES CLIENTES, SIN EMBARGO, ÉSTAS NO SE ESCUCHAN ENTRE SÍ.	50
<b>FIGURA 21.</b> PROBLEMA DEL NODO EXPUESTO.	51
<b>FIGURA 22.</b> <i>TILT</i> DE ANTENA EN SISTEMAS WLAN.	57
<b>FIGURA 23.</b> SECTORIZACIÓN Y ASIGNACIÓN DE CANALES ( $K=3, 4, 5$ ) EN REDES WLAN.	59
<b>FIGURA 24.</b> ENTORNOS TÍPICOS PARA A) MODELO WALFISH-BERTONI. B) MODELO COST231-WALFISH-IKEGAMI	63
<b>FIGURA 25.</b> ASIGNACIÓN DE CANALES EN UN (1) <i>CLUSTER</i> .	72
<b>FIGURA 26.</b> UBICACIÓN DE UNA CELDA CO-CANAL DE REFERENCIA A CON $I=J=1$	72
<b>FIGURA 27.</b> INTERCONEXIÓN ENTRE SECTORES A TRAVÉS DE UN <i>SWITCH</i> MEDIANTE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN NCTUNS.	75
<b>FIGURA 28.</b> POSIBLE UBICACIÓN DE LAS ANTENAS DE LOS PUNTOS DE ACCESO Y <i>WIRELESS BRIDGE</i> .	76
<b>FIGURA 29.</b> DIAGRAMA DE RED UNA RED WLAN MULTICELDA <i>OUTDOOR</i> CON UN <i>CLUSTER</i> DE 3 CELDAS.	76
<b>FIGURA 30.</b> MODELO CONCEPTUAL	86
<b>FIGURA 31.</b> OBTENCIÓN DEL RADIO DE COBERTURA ADECUADO A TRAVÉS DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN NCTUNS.	90
<b>FIGURA 32.</b> UBICACIÓN DE LA ESTACIÓN CLIENTE EN ZONA DE INTERFERENCIA	91
<b>FIGURA 33.</b> REPRESENTACIÓN DE LA TRANSMISIÓN DE VOZ Y DATOS SOBRE UNA CELDA.	92
<b>FIGURA 34.</b> <i>THROUGHPUT</i> VS. DISTANCIA. <i>CÓDEC G.711.</i>	94
<b>FIGURA 35.</b> <i>THROUGHPUT</i> VS. DISTANCIA. <i>CÓDEC G.729.</i>	94
<b>FIGURA 36.</b> <i>THROUGHPUT</i> VS. NO. ESTACIONES HACIENDO USO DEL <i>CÓDEC G.711</i>	95
<b>FIGURA 37.</b> RETARDO VS. NO. ESTACIONES. <i>CÓDEC G.711.</i>	95
<b>FIGURA 38.</b> PAQUETES RECIBIDOS VS. NO. ESTACIONES HACIENDO USO DEL <i>CÓDEC G.711</i> .	96

<b>FIGURA 39.</b> <i>THROUGHPUT</i> VS. NO ESTACIONES CON EL <i>CÓDEC</i> G.729.	97
<b>FIGURA 40.</b> RETARDO VS. INCREMENTO EN EL NÚMERO DE ESTACIONES. <i>CÓDEC</i> G.729.	98
<b>FIGURA 41.</b> PAQUETES RECIBIDOS VS. NÚMERO DE ESTACIONES. <i>CÓDEC</i> G.729.	98
<b>FIGURA 42.</b> <i>THROUGHPUT</i> VS. NÚMERO DE ESTACIONES EN UNA CELDA SECTORIZADA.	99
<b>FIGURA 43.</b> PAQUETES RECIBIDOS VS. NÚMERO DE ESTACIONES EN UNA CELDA SECTORIZADA.	99
<b>FIGURA 44.</b> RETARDO VS. NÚMERO DE ESTACIONES EN UNA CELDA SECTORIZADA.	100
<b>FIGURA 45.</b> <i>THROUGHPUT</i> VS. ESPACIAMIENTO DE CANAL DE CELDA ADYACENTE	101
<b>FIGURA 46.</b> COMPORTAMIENTO DEL RETARDO AL VARIAR EL CANAL DE LA CELDA ADYACENTE.	101
<b>FIGURA 47.</b> VARIACIÓN EN LOS PAQUETES RECIBIDOS VS. VARIACIÓN DEL CANAL ADYACENTE.	101
<b>FIGURA 48.</b> RETARDO EN UN <i>CLUSTER</i> CON K=3.	102
<b>FIGURA 49.</b> <i>THROUGHPUT</i> VS. NÚMERO DE ESTACIONES EN UN <i>CLUSTER</i> CON K=3.	103
<b>FIGURA 50.</b> PAQUETES RECIBIDOS VS. NÚMERO DE ESTACIONES EN UN <i>CLUSTER</i> CON K=3.	103
<b>FIGURA 51.</b> <i>THROUGHPUT</i> , RETARDO Y PAQUETES RECIBIDOS	104
<b>FIGURA 52.</b> <i>THROUGHPUT</i> VS. NO. STAS CON TRÁFICO DE DATOS (CON 14 STAS DE VOZ FIJAS)	105
<b>FIGURA 53.</b> PAQUETES RECIBIDOS VS. NO. DE STAS CON TRÁFICO DE DATOS (CON 14 STAS DE VOZ FIJAS)	106
<b>FIGURA 54.</b> RETARDO VS. NO. STAS CON TRÁFICO DE DATOS (CON 14 STAS DE VOZ FIJAS)	106

## LISTA DE TABLAS

<b>TABLA 1.</b> <i>CÓDECS</i> Y SUS CARACTERÍSTICAS.	9
<b>TABLA 2.</b> SEÑALES DE SIP	13
<b>TABLA 3.</b> LONGITUD DE PLCP Y ENCABEZADO PARA LA FAMILIA DE ESTÁNDARES IEEE 802.11.	24
<b>TABLA 4.</b> PARÁMETROS MAC PARA 802.11A, B, G. <b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>	
<b>TABLA 5.</b> MAPEO DE LAS CATEGORÍAS DE TRÁFICO SOBRE LAS CATEGORÍAS DE ACCESO.	35
<b>TABLA 6.</b> VALORES POR DEFECTO DE AIFSN Y AIFS PARA LOS ESTÁNDARES IEEE 802.11A/B/G	36
<b>TABLA 7.</b> VALORES POR DEFECTO DE LOS PARÁMETROS QUE DETERMINAN LA CALIDAD DE SERVICIO DE UNA APLICACIÓN EN PARTICULAR	36
<b>TABLA 8.</b> THROUGHPUT Y NÚMERO DE SESIONES VOIP EN LOS ESTÁNDARES 802.11 A/B/G	46
<b>TABLA 9.</b> CANALES Y FRECUENCIAS ASIGNADAS A WLAN EN LA BANDA ISM, ESTÁNDARES 802.11A, B/G	53
<b>TABLA 10.</b> CÁLCULO DE NÚMERO DE CANALES POR CELDA, NÚMERO DE <i>CLUSTERS</i> Y CAPACIDAD TOTAL DEL SISTEMA PARA UN ESCENARIO DE 84 CELDAS	54
<b>TABLA 11.</b> ELEMENTOS DE RED POR <i>CLUSTER</i> (K=3)	76
<b>TABLA 12.</b> CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO FINAL	77
<b>TABLA 13.</b> TABLA COMPARATIVA	85
<b>TABLA 14.</b> PARÁMETROS DE ENTRADA, VARIABLES DE SALIDA Y SUS UNIDADES DE MEDIDA	88
<b>TABLA 15.</b> NÚMERO DE ESTACIONES SEGÚN EL ESCENARIO	107



## ACRÓNIMOS

<b>AC</b>	Access Categories ( <i>Categorías de Acceso</i> )
<b>ACELP</b>	Algebraic Code Excited Linear Prediction ( <i>Predicción Lineal Excitada por Tabla de Códigos Algebraicos</i> )
<b>ADSL</b>	Asymmetric Digital Subscriber Line ( <i>Línea de Suscriptor Digital Asimétrico</i> )
<b>ADPCM</b>	Adaptive Differential Pulse Code Modulation ( <i>Modulación por Codificación de Impulsos Diferencial Adaptativa</i> )
<b>AIFS</b>	Arbitration Interframe Space ( <i>Espacio Inter-Trama Arbitrario</i> )
<b>AIFSN</b>	Arbitration Interframe Space Number ( <i>Número Arbitrario de Espacio Inter-Trama</i> )
<b>AMR</b>	Adaptive Multi-Rate ( <i>Tasa Binaria Adaptativa</i> )
<b>AMR-WB</b>	AMR Wider speech Bandwidth ( <i>AMR de Banda Ancha</i> )
<b>AP</b>	Access Point ( <i>Punto de Acceso</i> )
<b>API</b>	Application Program Interface ( <i>Interfaz de Programación de Aplicaciones</i> )
<b>APSD</b>	Automatic Power-Save Delivery ( <i>Entrega Automática con Ahorro de Energía</i> )
<b>ATM</b>	Asynchronous Transfer Mode ( <i>Modo de Transferencia Asíncrono</i> )
<b>BE</b>	Best Effort ( <i>Mejor Esfuerzo</i> )
<b>BER</b>	Bit Error Rate ( <i>Tasa de Bits Erróneos</i> )
<b>BS</b>	Base Station ( <i>Estación Base</i> )
<b>BSS</b>	Basic Service Set ( <i>Conjunto de Servicio Básico</i> )
<b>CAP</b>	Controlled Access Phases ( <i>Fases de Acceso Controlado</i> )
<b>CCK</b>	Complementary Code Keying ( <i>Codificación por Código Complementario</i> )
<b>CRTP</b>	Compressed Real Time Protocol ( <i>Protocolo de Tiempo Real Comprimido</i> )
<b>CSMA/CA</b>	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance ( <i>Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisión</i> )
<b>CCITT</b>	International Consultative Committee for Telegraph and Telephone ( <i>Comité Consultivo Internacional Telegráfico y Telefónico</i> )
<b>CELP</b>	Code Excited Linear Prediction ( <i>Predicción Lineal con Excitación por Código</i> )
<b>CFB</b>	Contention Free Burst ( <i>Ráfagas Libres de Contienda</i> )
<b>CFP</b>	Contention Free Period ( <i>Período Libre de Contienda</i> )
<b>CNG</b>	Comfort Noise Generation ( <i>Generador de Ruido de Confort</i> )
<b>CP</b>	Contention Period ( <i>Período de Contienda</i> )
<b>CS-ACELP</b>	Conjugate Structure Algebraic Code Excited Linear Prediction ( <i>Estructura Conjugada de Predicción Lineal Excitada por tabla de Códigos Algebraicos</i> )
<b>CSMA/CD</b>	Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection ( <i>Acceso al Medio por Detección de Portadora y Detección de Colisiones</i> )
<b>CSRC</b>	Contributing Source ( <i>Fuente de Contribución para RTP</i> )
<b>CTS</b>	Clear To Send ( <i>Preparado para Enviar</i> )
<b>CW</b>	Contention Window ( <i>Ventana de Contienda</i> )
<b>DBPSK</b>	Differential Binary Phase Shift Keying ( <i>Modulación Diferencial de Fase Binaria</i> )
<b>DCF</b>	Distributed Coordination Function ( <i>Función de Coordinación Distribuida</i> )
<b>DiffServ</b>	Differentiated Service ( <i>Servicios Diferenciados</i> )
<b>DIFS</b>	DCF Interframe Space ( <i>Espacio Inter-Trama DCF</i> )
<b>DLP</b>	Direct Link Protocol ( <i>Protocolo de Enlace Directo</i> )
<b>DQPSK</b>	Differential QuadraPhase Shift Keying ( <i>Modulación Diferencial de Cuadratura de Fase</i> )

<b>DRS</b>	Dynamic Rate Shifting ( <i>Cambio Dinámico de Velocidad</i> )
<b>DS</b>	Direct Sequence ( <i>Secuencia Directa</i> )
<b>DS</b>	Distribution System ( <i>Sistema de Distribución</i> )
<b>DSP</b>	Digital Signal Processor ( <i>Procesador Digital de Señal</i> )
<b>DSSS</b>	Direct Sequence Spread Spectrum ( <i>Espectro Ensanchado por Secuencia Directa</i> )
<b>DSVD</b>	Digital Simultaneous Voice and Data ( <i>Voz y Datos Simultáneos Digitales</i> )
<b>DTMF</b>	Dual Tone Multi Frequency ( <i>Tono Dual de Multifrecuencia</i> )
<b>DTX</b>	Discontinuous Transmission ( <i>Transmisión Discontinua</i> )
<b>EDCA</b>	Enhanced Distributed Channel Access ( <i>Acceso al Canal Distribuido Mejorado</i> )
<b>EDGE</b>	Enhanced Data for GSM Evolution ( <i>Tasas mejoradas de Datos para la Evolución Global de GSM</i> )
<b>EIFS</b>	Extended Interframe Space ( <i>Espacio Inter-Trama Extendido</i> )
<b>EIRP</b>	Effective Isotropic Radiated Power ( <i>Potencia Eficaz Radiada Isotrópicamente</i> )
<b>ESS</b>	Extended Service Set ( <i>Conjunto de Servicio Básico Extendido</i> )
<b>ETSI</b>	European Telecommunications Standards Institute ( <i>Instituto de Estándares de Telecomunicaciones Europeo</i> )
<b>FBR</b>	Front to Back Ratio ( <i>Relación Frente-Espalda</i> )
<b>FH</b>	Frequency Hopping ( <i>Salto en Frecuencia</i> )
<b>FHSS</b>	Frequency Hopped Spread Spectrum ( <i>Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencia</i> )
<b>FIFO</b>	First In First Out ( <i>Entra Primero Sale Primero</i> )
<b>FSM</b>	Finite State Machina ( <i>Máquina de Estados Finitos</i> )
<b>FTP</b>	File Transfer Protocol ( <i>Protocolo de Transferencia de Archivos</i> )
<b>GNTT</b>	Grupo de Investigación y Desarrollo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones
<b>GPL</b>	General Public Licence ( <i>Licencia Pública General</i> )
<b>GPRS</b>	General Packet Radio Service ( <i>Servicio de Radio de Paquetes Generales</i> )
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communications ( <i>Sistema Global para Comunicaciones Móviles</i> )
<b>GUI</b>	Graphical User Interface ( <i>Interfaz de Usuario Gráfica</i> )
<b>HC</b>	Hybrd Coordinator ( <i>Coordinador Híbrido</i> )
<b>HCCA</b>	HCF Hybrid Controlled Channel Access ( <i>Acceso al Canal Controlado HCF</i> )
<b>HCF</b>	Hybrid Coordination Function ( <i>Función de Coordinación Híbrida</i> )
<b>HTTP</b>	Hypertext Transmission Protocol ( <i>Protocolo de Transferencia de Hipertexto</i> )
<b>IBSS</b>	Independent Basic Service Set ( <i>Conjunto de Servicio Básico Independiente</i> )
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronic Engineers ( <i>Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos</i> )
<b>IETF</b>	Internet Engineering Task Force ( <i>Fuerza de Trabajo en Ingeniería de Internet</i> )
<b>IP</b>	Internet Protocol ( <i>Protocolo de Internet</i> )
<b>IPv6</b>	Internet Protocol version 6 ( <i>Protocolo de Internet versión 6</i> )
<b>ISM</b>	Industrial, Scientific and Medical ( <i>Industrial, Científica y Médica</i> )
<b>ITU-T</b>	Internacional Telecommunications Union – Telecommunication ( <i>Unión Internacional de Telecomunicaciones, en su rama de Telecomunicaciones</i> )
<b>LOS</b>	Line of Sight ( <i>Línea de Vista</i> )
<b>MAC</b>	Medium Access Control ( <i>Control de Acceso al Medio</i> )
<b>MCGP</b>	Media Gateway Control Protocol ( <i>Protocolo de Control de Pasarelas hacia los Medios</i> )

<b>MCU</b>	Multipoint Control Unity ( <i>Unidades de Control Multipunto</i> )
<b>MOS</b>	Mean Opinion Score ( <i>Nota Media de Opinión</i> )
<b>MP-MLQ2</b>	Multi-Pulse Maximum-Likelihood Quantization ( <i>Cuantificación de Máxima Probabilidad en Múltiples Pulsos</i> )
<b>MSDU</b>	MAC Service Data Unit ( <i>Unidad de Datos de Servicio MAC</i> )
<b>NAM</b>	Network Animator ( <i>Animación de Red</i> )
<b>NAV</b>	Network Allocation Vector ( <i>Vector de Asignación de Red</i> )
<b>NSP</b>	Network Service Provider ( <i>Proveedor de Servicios de Red</i> )
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplex ( <i>Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal</i> )
<b>OSI</b>	Open System Interconnection ( <i>Interconexión de Sistemas Abiertos</i> )
<b>OSPF</b>	Open Shortest Path First ( <i>El Camino más Corto Primero</i> )
<b>PDA</b>	Personal Digital Assistant ( <i>Asistente Digital Personal</i> )
<b>PC</b>	Point Coordinator ( <i>Punto Coordinador</i> )
<b>PCF</b>	Point Coordination Function ( <i>Función de Coordinación Puntual</i> )
<b>PCM</b>	Pulse Code Modulation ( <i>Modulación por Pulsos Codificados</i> )
<b>PIFS</b>	PCF Interframe Space ( <i>Espacio Inter-Trama PCF</i> )
<b>PGP</b>	Pretty Good Privacy ( <i>Privacidad Bastante Buena</i> )
<b>PLCP</b>	Physical Layer Convergence Procedure ( <i>Procedimiento de Convergencia sobre el Nivel Físico</i> )
<b>PMP</b>	Point to Multipoint ( <i>Punto a Multipunto</i> )
<b>PWLAN</b>	Public Access WLAN Networks ( <i>Redes de Acceso Público WLAN</i> )
<b>QBSS</b>	Quality of Service Basic Service Set ( <i>Conjunto de Servicio Básico con Calidad de Servicio</i> )
<b>QoS</b>	Quality of Service ( <i>Calidad de Servicio</i> )
<b>QSTA</b>	Quality of Service Stations ( <i>Estaciones con Calidad de Servicio</i> )
<b>RADIUS</b>	Remote Authentication Dial-In User Service ( <i>Servicio de Usuario de Mercado con Autenticación Remota</i> )
<b>RAS</b>	Remote Access Service ( <i>Servicios de Acceso Remoto</i> )
<b>RDSI</b>	Red Digital de Servicios Integrados
<b>RIP</b>	Routing Information Protocol ( <i>Protocolo de Información de Ruta</i> )
<b>RNC</b>	Radio Network Controller ( <i>Controlador Radio de Red</i> )
<b>ROI</b>	Return of Investment ( <i>Retorno de Inversión</i> )
<b>RTCP</b>	Real Time Control ( <i>Protocolo Protocolo para Control de Transmisiones en Tiempo Real</i> )
<b>RTP</b>	Real Time Transport Protocol ( <i>Protocolo de Transporte en Tiempo Real</i> )
<b>RTPC</b>	Red Telefónica Pública Conmutada
<b>RTS</b>	Request To Send ( <i>Solicitud de Envío</i> )
<b>S/ MIME</b>	Secure Multipurpose Internet Mail Extensions ( <i>Extensiones Multipropósito Seguras para el Correo de Internet</i> )
<b>SDP</b>	Session Description Protocol ( <i>Protocolo de Descripción de Sesión</i> )
<b>SIFS</b>	Short Interframe Space ( <i>Espacio Inter-Trama Corto</i> )
<b>SIP</b>	Session Initiation Protocol ( <i>Protocolo de Inicio de Sesión</i> )
<b>SLA</b>	Service Level Agreement ( <i>Acuerdo a Nivel de Servicio</i> )
<b>SME</b>	Station Management Entity ( <i>Entidad de Gestión de Estaciones</i> )
<b>SMTP</b>	Simple Mail Transfer Protocol ( <i>Protocolo Simple de Transferencia de Correo</i> )
<b>SOHO</b>	Small Office / Home Office ( <i>Pequeña Oficina/Oficina en Casa</i> )
<b>SS7</b>	Signaling System Number 7 ( <i>Sistema de Señalización Número 7</i> )
<b>SSID</b>	Service Set Identifier ( <i>Identificador de Conjunto de Servicio</i> )
<b>SSRC</b>	Synchronization Source ( <i>Fuente de Sincronización para RTP</i> )

<b>TC</b>	Traffic Categories ( <i>Categorías de Tráfico</i> )
<b>TCID</b>	Traffic Category Identification ( <i>Identificador de Categoría de Tráfico</i> )
<b>TCP</b>	Transmission Control Protocol ( <i>Protocolo de Control de Transmisión</i> )
<b>TDM</b>	Time Division Multiplexing ( <i>Multiplexación por División de Tiempo</i> )
<b>TKIP</b>	Temporal Key Integrity Protocol ( <i>Protocolo de Integridad de Llave Temporal</i> )
<b>TS</b>	Traffic Streams ( <i>Flujos de Tráfico</i> )
<b>TSEPC</b>	Traffic Specification ( <i>Especificación de Tráfico</i> )
<b>TU</b>	Transaction User ( <i>Transacción de Usuario</i> )
<b>TXOP</b>	Transmission Opportunity ( <i>Oportunidad de Transmisión</i> )
<b>UDP</b>	User Datagram Protocol ( <i>Protocolo de Datagramas de Usuario</i> )
<b>UE</b>	User Equipment ( <i>Equipo de Usuario</i> )
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telephone System ( <i>Sistema de Telecomunicaciones Móviles Universales</i> )
<b>VAD</b>	Voice Activity Detection ( <i>Detección de Actividad de Voz</i> )
<b>VLAN</b>	Virtual Local Area Network ( <i>Redes de Área Local Virtuales</i> )
<b>VoIP</b>	Voice over IP ( <i>Voz sobre IP</i> )
<b>VPN</b>	Virtual Private Network ( <i>Red Privada Virtual</i> )
<b>WAN</b>	Wide Area Network ( <i>Redes de Área Extensa</i> )
<b>WCDMA</b>	Wideband Code Division Multiple Access ( <i>Acceso Múltiple de Banda Ancha Por División De Código</i> )
<b>WDS</b>	Wireless Distribution System ( <i>Sistema de Distribución Inalámbrica</i> )
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network ( <i>Redes inalámbricas de Área Local</i> )
<b>WMM</b>	Wi-Fi Multimedia ( <i>Wi-Fi Multimedia</i> )
<b>WMM-SA</b>	Wi-Fi Multimedia Scheduling Access ( <i>Acceso Programado Wi-Fi Multimedia</i> )
<b>XTP</b>	Express Transfer Protocol ( <i>Protocolo de Transferencia Expresa</i> )

## RESUMEN

Actualmente, la convergencia de servicios de video, voz y datos sobre una infraestructura común se ha convertido en una temática que requiere de un tratamiento especial con el fin de proporcionar un determinado grado de Calidad de Servicio. Este es el caso del estándar IEEE 802.11e el cual realiza mejoras a nivel MAC de su antecesor, el estándar 802.11 y que proporciona una determinada probabilidad de acceso al medio de acuerdo a los requerimientos de QoS de cada tipo de tráfico. Sin embargo, hasta el momento el despliegue de Redes WLAN en lugares públicos ha sido orientado hacia una celda dejando a un lado el análisis de parámetros como *throughput*, retardo y pérdida de paquetes a nivel de múltiples celdas. Por lo anterior, en el presente trabajo de grado se aplican conceptos de tecnologías como la telefonía celular y VoIP para el diseño de una red WLAN Multicelda *outdoor* con soporte para 802.11e, con el fin de generar un conjunto de criterios que permitan la transmisión de servicios de voz y datos que satisfagan los criterios de QoS propios de cada uno de estos tipos de tráfico. Es por esto que a través de la aplicación de una metodología de simulación apropiada se llevaron a cabo simulaciones sobre el diseño de red propuesto y haciendo uso del simulador NCTUns 3.0, fue posible analizar los parámetros mencionados anteriormente, con el fin de establecer la capacidad de este diseño, encontrando además, el papel fundamental que desempeña la selección del *códec* apropiado, ya que éste influye directamente en la capacidad de cada Punto de Acceso. Dichos análisis se realizaron tanto a nivel de celda como multicelda y, por otro lado, al tratarse de entornos *outdoor*, también se determinó el área de cobertura aproximada de la topología de red propuesta. De esta manera, se dio origen al presente trabajo de grado con el fin de que el lector encuentre con mayor detalle aspectos relacionados con la temática tratada a lo largo del documento.

# INTRODUCCIÓN

En la sociedad actual la integración de servicios de voz, vídeo y datos haciendo uso de una misma infraestructura se ha convertido en una tendencia tecnológica, que exige que los proveedores de servicios y en particular los proveedores de red se adapten a los requerimientos de cada uno de éstos. En particular, en el campo de las tecnologías inalámbricas, las Redes de Área Local Inalámbricas (*Wireless Local Area Network*, WLAN) han tenido una gran acogida debido a factores como el bajo costo y facilidad de despliegue, la alta velocidad de transmisión de datos y su operación sobre una porción del espectro no licenciado (banda ISM- Industrial, Científica y Médica) y han motivado a la industria inalámbrica a poner en funcionamiento tales redes en sitios públicos como aeropuertos, cafeterías, hoteles, centros de convención, entre otros. Sin embargo, las WLAN poseen una limitante que está relacionada con el rango de transmisión de sus equipos lo cual restringe el radio de cobertura a unos cuantos metros. En contraste, esta inconveniente es superado completamente por los actuales sistemas de telefonía celular los cuales pueden garantizar una cobertura de alrededor de 10Km con un buen grado de servicio perfilando a esta tecnología como una excelente opción en despliegues sobre áreas urbanas extensas o rurales. Adicionalmente la evolución hacia sistemas de tercera generación (3G) se basa en el hecho de proporcionar una conectividad global (All IP) que permita la transmisión de datos a “altas” velocidades, siendo estas últimas muy bajas en comparación a las brindadas por las de WLAN. Como consecuencia de esto, dadas las ventajas de la telefonía celular y las redes WLAN, el mercado ha iniciado la comercialización de equipos que permiten una dualidad Wi-Fi/Celular a través de la interconexión de dos redes completamente separadas, sin embargo, la posibilidad de diseñar una Red Inalámbrica de Área Local para entornos *outdoor* basándose en los principios de telefonía celular también resulta atractiva.

Por otro lado, la prestación de servicios de comunicación de datos haciendo uso de la tecnología WLAN se ha concentrado en sectores en donde la distribución geográfica no exige una planeación rigurosa, a diferencia de los entornos *outdoor*. Con respecto a esto, existen problemas que los operadores deben enfrentar continuamente: nodo oculto, nodo expuesto, desvanecimiento por multitrayecto, problema de Línea de Vista (*Line of Sight*, LOS), *handover*, pero que mediante el análisis y un uso eficiente de ésta tecnología se puede alcanzar el éxito en despliegues a gran escala. Como se mencionó anteriormente, es deseable la integración de servicios sobre una misma red, pero al hacer referencia a servicios que demandan de un tratamiento diferente se debe tener en cuenta la aplicación de esquemas que aseguren una determinada calidad razón por la cual se dio inicio a investigaciones que dieran como resultado alternativas que brindaran mejoras en el desempeño de las WLAN. Es así como un grupo del IEEE 802.11, denominado Grupo de Trabajo E (*Task Group E*, TGe), se reunió para atender las necesidades de Calidad de Servicio (*Quality of Service*, QoS) y crear soluciones que permitieran soportar tales requerimientos. Como resultado se obtuvo la aprobación del estándar IEEE 802.11e el cual realiza modificaciones a nivel de Control de Acceso al Medio (*Medium Access Control*, MAC) para así brindar un tratamiento adecuado según el tipo de tráfico que una estación desea transmitir.

Otro aspecto a considerar en el diseño de cualquier tipo de red es la estimación de la capacidad del sistema. Desde el punto de vista del operador de red es muy importante conocer el tipo de usuarios que está en capacidad de soportar y debe tener en cuenta múltiples aspectos que brinden beneficios tanto para éste como para sus clientes. Por

ejemplo, muchos operadores han intentado implementar redes inalámbricas a gran escala utilizando antenas omnidireccionales y Puntos de Acceso (*Access Points*, AP) de bajo costo dejando a un lado una adecuada planeación de frecuencias y un emplazamiento ordenado de los APs. Es por esto que el presente trabajo de grado enmarcado en la línea de Comunicaciones Inalámbricas del Grupo I+D de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT), propone un conjunto de criterios obtenidos a partir de la recolección de las características más relevantes de las tecnologías celulares y de Voz sobre IP (*Voice over IP*, VoIP) con el fin de aplicarlos al diseño de sistemas WLAN. Además, la necesidad de estudiar conceptos relacionados con VoIP se ve influenciada por aspectos como: la creciente necesidad de integrar y ampliar el portafolio de servicios de un proveedor, permitir el acceso a un sistema empresarial de VoIP vía Redes Privadas Virtuales (*Virtual Private Networks*, VPN) o como un servicio adicional brindado en los *hotspots*, para los cuales se deben considerar los costos. Con el uso de WLAN es de especial interés la transmisión de voz, ya que, este inconveniente en principio encuentra una vía de solución por los costos de infraestructura y la existencia de plataformas software de código abierto haciendo que éstos disminuyan ostensiblemente y además se pueda brindar una calidad comparable a la telefonía convencional.

A pesar de que el estándar 802.11e se aprobó en el mes de julio del año 2005 el número de dispositivos que hacen uso de este estándar es muy reducido, limitando así la posibilidad de evaluar experimentalmente los criterios propuestos. Sin embargo, no es desconocida la existencia de herramientas de simulación que permiten el análisis del comportamiento de ciertos parámetros de interés razón por la cual se hizo uso de una herramienta que se adapte de la mejor manera a los objetivos de este trabajo de grado, no sin antes realizar un análisis previo de las ventajas y desventajas de los simuladores existentes en la actualidad.

Teniendo en cuenta lo anterior, este trabajo busca resolver la necesidad que se tiene respecto de una referencia para el diseño de una red WLAN *outdoor* multicelda para escenarios de operadores de *hotspot* con el fin de brindar de manera conjunta servicios de datos y voz a usuarios nómadas cuando se utiliza 802.11e como esquema de QoS a nivel MAC. De esta manera, el contenido de este trabajo de grado brinda una explicación detallada del funcionamiento de 802.11e de manera que el lector pueda comprender los mecanismos que se utilizan para proporcionar QoS. Por otra parte, se hará énfasis sobre la transmisión de la voz como servicio de tiempo real transportado sobre una red WLAN de tal manera que se logre garantizar una QoS aceptable y finalmente se aplicarán conceptos de redes celulares de manera que sea posible implementar redes multicelda en entornos *outdoor*. De este modo este trabajo de grado consta de cinco capítulos recopilados de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se tratarán temas relacionados con el procesamiento que requiere la voz para ser transportada y los parámetros que entran en juego. Se estudiarán algunos principios de diseño de redes de telefonía celular que pueden aplicarse en WLAN y así mismo se analizarán temas concernientes con el grupo de tecnologías que hacen parte de Wi-Fi (*Wireless Fidelity*).

El capítulo 2 se compone de dos secciones: en la primera se explican los conceptos de QoS y la aplicación de los mismos sobre el estándar 802.11 que dieron como resultado a 802.11e. Además, se explican a fondo las variaciones realizadas sobre la capa MAC y se dan a conocer las funciones de acceso al medio: Acceso al Canal Distribuido Mejorado (*Enhanced Distributed Channel Access*, EDCA) y Acceso al Canal Controlado HCF (*HCF*

*Hybrid Controlled Channel Access, HCCA*). En la segunda sección se hace referencia a una estimación teórica de la capacidad de un sistema WLAN 802.11e mediante ejemplos que ilustren el efecto de la escogencia de un *códec* sobre el ancho de banda y el número de usuarios que un punto de acceso puede soportar.

En el capítulo 3 se exponen los criterios para el diseño de redes WLAN multicelda y los problemas típicos cuando éstas se despliegan en entornos *outdoor*, finalizando con una guía de implementación de redes WLAN multicelda *outdoor* con soporte 802.11e.

En el capítulo 4 se propone un diseño que considera la selección de los conceptos que brinden mayor aporte al diseño específico de un sistema de comunicación inalámbrica de acuerdo a ciertas condiciones ideales que sirven de base para su posterior simulación.

Finalmente, en el capítulo 5 se incluye el estudio realizado sobre diferentes herramientas de simulación, la selección de la misma y el desarrollo de un conjunto de simulación como método de evaluación basado en la metodología de simulación escogida.



# 1. PRINCIPIOS DE DISEÑO DE TECNOLOGÍAS RELACIONADAS

Para el diseño y simulación de una red que permita el transporte de voz mediante 802.11e en entornos *outdoor*, se han estudiado características relacionadas con las tecnologías WLAN, VoIP y Telefonía Celular, con el objetivo de establecer un marco teórico necesario para la conformación de una base sobre la cual se fundamentará este proyecto.

En el presente capítulo se abarcan diferentes temas entre los cuales cabe destacar los problemas que se producen en VoIP a causa del retardo, así como las técnicas que permiten solucionar tales inconvenientes; también se incluyen aspectos concernientes a tecnologías celulares, como son su arquitectura y planeación de frecuencias; y finalmente se estudian las diferentes tecnologías que abarca Wi-Fi.

## 1.1 VoIP

El desarrollo de Voz sobre IP ha tomado en los últimos años un papel muy importante en las continuas transformaciones dentro de la industria de las telecomunicaciones debido a factores técnicos y económicos que han hecho de esta tecnología una opción viable y que gracias a un fuerte proceso de integración de aplicaciones de tiempo real sobre redes IP ha sido posible utilizar una misma red para el transporte de diferentes tipos de tráfico como voz, datos y video, eliminando así la necesidad de utilizar redes independientes para cada uno de estos servicios.

Aunque el concepto de integración de servicios no es nuevo, en la actualidad su auge se debe principalmente a la popularidad, expansión y flexibilidad que ha tenido Internet, la “Red de Redes” la cual combina elementos de telecomunicaciones, informática, servicios de información y comercio electrónico para brindar ventajas económicas e impulsar la convergencia entre redes de voz y redes de datos. Al contrario de la Red Telefónica Pública Conmutada (RTPC) que se basa en la conmutación de circuitos, Internet es una red de conmutación de paquetes, lo que significa que la información se maneja en forma de paquetes de datos definidos por el Protocolo de Internet (*Internet Protocol*, IP). Estos datos pueden ser de cualquier tipo, incluida la voz digitalizada, lo cual es exactamente VoIP, voz que se transforma en paquetes de acuerdo al protocolo IP y que se envía sobre cualquier red IP para facilitar la comunicación entre dos o más puntos.

Sin embargo, para los desarrolladores de VoIP los problemas relacionados con la calidad de la voz han sido los mayores desafíos a enfrentar, pues, el usuario final espera resultados de percepción comparables a los obtenidos en una RTPC. Es así como la percepción de la calidad de la voz es función de muchos factores como el retardo, el *jitter*<sup>1</sup> ó fluctuación de fase, y la pérdida de paquetes, sobre los cuales se ha hecho énfasis con el propósito de desarrollar aplicaciones específicas para sistemas de codificación que permitan no sólo el monitoreo de estos factores sino también la reducción de los mismos para lograr mejoras en la calidad de la voz.

---

<sup>1</sup> Se acostumbra dejar en inglés.

A continuación se describirán tanto la problemática de estos fenómenos como las soluciones que se han obtenido luego de varias investigaciones mostrando el impacto que estos tienen sobre la calidad de la voz.

### 1.1.1 Retardo o Latencia

El retardo punta a punta o latencia [1] es un problema que siempre estará presente, que no puede eliminarse sin importar el tipo de red que se utilice, y cuyo efecto es mayor en VoIP porque, a diferencia de los datos, la voz tiene una tolerancia bastante escasa hacia el retardo.

Tal retardo se refiere al tiempo que transcurre desde que la voz del interlocutor emisor es enviada hasta que es recibida por los oídos de la persona receptora. Está compuesto fundamentalmente por el retardo de propagación de la señal a través del medio de transmisión (cableado o inalámbrico), por el retardo de codificación/decodificación, el retardo de empaquetamiento, retardo de *jitter* y el retardo en la red.

- El retardo de propagación es el tiempo requerido por la señal óptica o eléctrica para viajar a través de un medio de transmisión y es una función de la distancia geográfica.
- El retardo de empaquetamiento depende del tamaño de la información que contiene cada datagrama IP y de las tecnologías a nivel físico y de enlace. Entre más pequeño sea el tamaño de los paquetes la probabilidad de que un retardo sea nulo es mayor.
- Los procesos de codificación y decodificación de la señal, en este caso, el sonido de la voz, conllevan a un cierto tiempo de procesamiento de la información que se refleja como un incremento del retardo y cuyo valor varía de acuerdo con el tipo de algoritmo de codificación seleccionado.
- El retardo de *jitter* se define como la variación del retardo y es generado principalmente por los elementos de red y el medio de transmisión, que debido a situaciones de congestión o problemas puntuales producen retardos variables e impredecibles. En otras palabras, el *jitter* es la diferencia de tiempo entre cuando se esperaba recibir un paquete y cuando en realidad se recibe. Este inconveniente obliga a encolar los paquetes para compensar dichas variaciones a través de una técnica denominada *buffering*, la cual consiste en colocar un espacio de memoria para almacenamiento temporal de datos (*buffer*) que amortigüe el *jitter*. Sin embargo, esto produciría un aumento de la latencia por lo que se imponen ciertos límites al tamaño del buffer.
- El retardo en la red hace referencia al tiempo que tardan los paquetes en los *buffers* de entrada y de salida de los enrutadores que se encuentren a lo largo del enlace, así como en los *buffer* de *jitter* que se hallan en las pasarelas VoIP que permiten el acople de protocolos entre tecnologías de red distintas. Además, existe la probabilidad, y de hecho ocurre en situaciones de sobrecarga, de que se produzcan errores en las tablas de enrutamiento y los paquetes sean enviados a un destinatario erróneo o incluso sean descartados. En VoIP la pérdida de paquetes es inaceptable, ya que, el rendimiento de las llamadas se verá afectado y la calidad de la voz será escasa cuando dicha pérdida supere el 5% de todos los paquetes según lo indican investigaciones realizadas por el SANS (SysAdmin, Audit, Network, Security Institute) [2]. Ante estos inconvenientes, cada vez más pasarelas VoIP y enrutadores utilizan algoritmos de compresión de voz que

ayudan a optimizar la infraestructura de la red para que menos paquetes se pierdan y obtener de dicha manera tanta capacidad como sea posible.

Gracias a investigaciones se ha determinado, en la recomendación G.114 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, en su rama de Telecomunicaciones (*Internacional Telecommunications Union – Telecommunication*, ITU-T), que retardos menores a los 150 ms pasan desapercibidos por el oído humano, sin embargo, si ese tiempo aumenta entonces la inteligibilidad de una conversación es deficiente, e inclusive, inaceptable.

## 1.2 CÓDECS

**Códec** es una abreviatura de **Codificador-Decodificador** que describe una especificación implementada en software, hardware o una combinación de ambos, capaz de transformar un archivo con un flujo de datos o una señal. Estos pueden codificar la señal y recuperarla o descifrarla del mismo modo para la reproducción o la manipulación en un formato más apropiado. Sin embargo, la mayoría de *códecs* provocan pérdidas de información para conseguir que el tamaño del archivo destino sea lo más pequeño posible.

Un **códec de audio** es un tipo de *códec* específicamente diseñado para la compresión y descompresión de señales de sonido audible para el ser humano, tal como música o conversaciones, que cumple fundamentalmente la función de reducir la cantidad de datos digitales necesarios para reproducir una señal auditiva. Lo que comúnmente se denomina "compresión de datos", pero aplicado a un fin muy concreto.

Por ello, existen fundamentalmente dos aplicaciones de los *códec* de audio:

- **Almacenamiento:** útil para reproductores multimedia que pueden reproducir sonido almacenado, por ejemplo, en un disco duro, CD-ROM o tarjeta de memoria.
- **Transmisión:** útil para implementar redes de videoconferencia y Telefonía IP.

Existen múltiples tipos de *códecs*, entre los que cabe destacar los que se encuentran en las recomendaciones de la serie G de la ITU-T, y que se diferencian por el tipo de algoritmo de compresión que utilizan el cual influye en el desempeño del *códec* y en la velocidad de transmisión de datos. A continuación se describirán algunos de los *códecs* que se encuentran en las recomendaciones de la serie G de la ITU-T [3].

- **G.711:** El Comité Consultivo Internacional Telegráfico y Telefónico (*International Consultative Committee for Telegraph and Telephone*, CCITT) aprobó la recomendación del G.711, el cual es un *códec* de voz que utiliza Modulación por Pulsos Codificados (*Pulse Code Modulation*, PCM) basado en el teorema de muestreo, el cual especifica que para muestrear la señal original se requiere al menos el doble de frecuencia de ésta, y con los valores obtenidos (normalizándolos a un número de bits), se puede codificar dicha señal en un tren de impulsos de alta frecuencia que porta la señal analógica original. Opera a una velocidad de muestreo de 8 KHz, con 8 bits por muestra para compresión y descompresión de la voz lo que permite su transmisión y recepción como datos binarios. Éste *códec*, que ejecuta la ley  $\mu$  y la ley A para codificación y decodificación, se trata de un estándar internacional para codificación de audio a 64 Kbps que se usa ampliamente en redes telefónicas.

En la Figura 1 se observa el *códec* G.711 cuyo proceso de encapsulamiento se explicará en el capítulo siguiente.

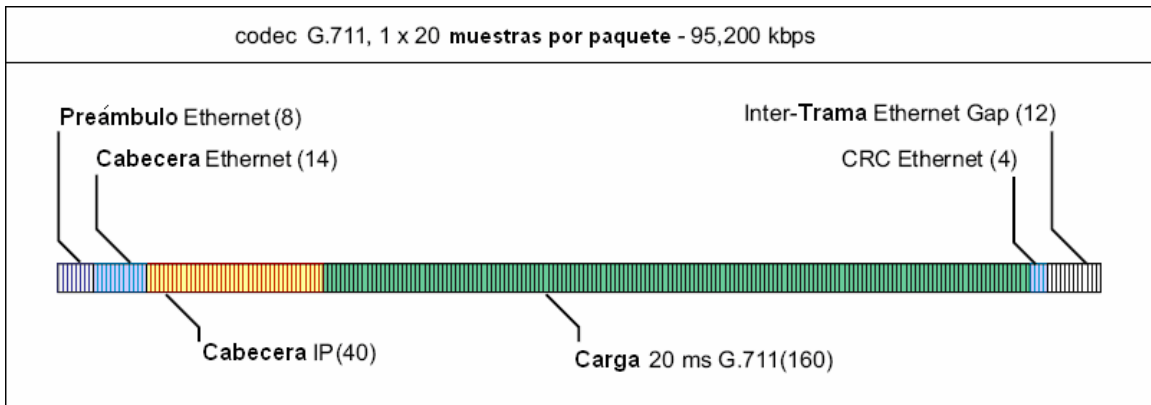
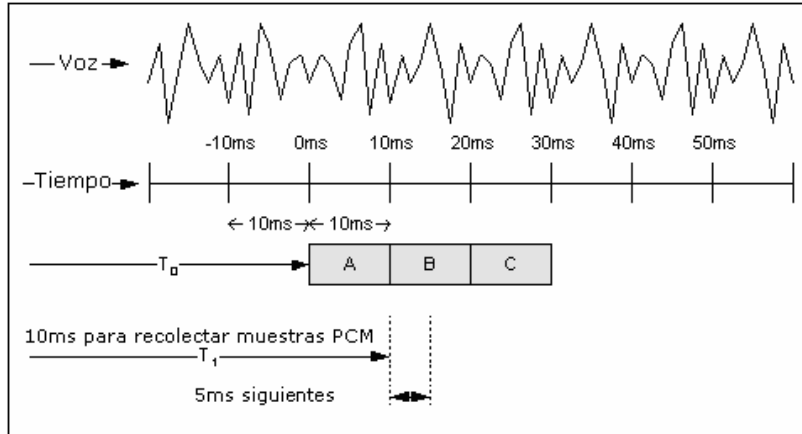


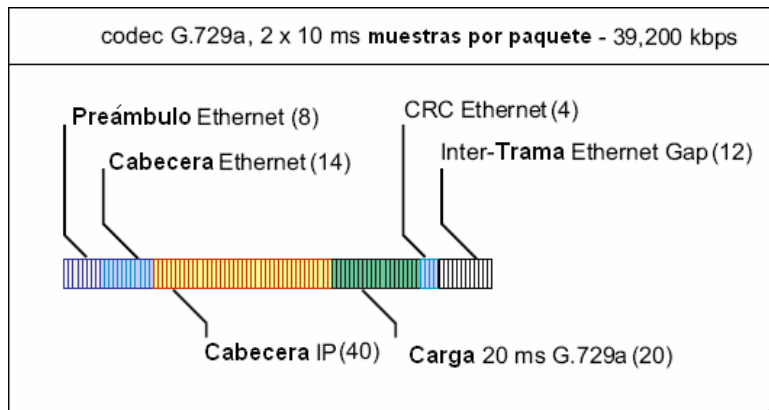
Figura 1. *Códec* G.711

- **G.723.1:** Este *códec* de audio, adoptado por la ITU en noviembre de 1995, implementa una compresión y descompresión dual de señales de 8 KHz, las cuales pueden ser voz u otras componentes de señales de audio de servicios multimedia, y utiliza dos velocidades de bit: 5.3 y 6.3 Kbps, basadas en tecnologías de Cuantificación de Máxima Probabilidad en Múltiples Pulsos (*Multi-Pulse Maximum-Likelihood Quantization*, MP-MLQ2) y Predicción Lineal Excitada por Tabla de Códigos Algebraicos (*Algebraic Code Excited Linear Prediction*, ACELP), el cual es un algoritmo de codificación que distribuye un conjunto limitado de pulsos como respuesta de un filtro de predicción lineal, respectivamente. La calidad de la voz mejora a medida que aumenta la velocidad de bits, sin embargo, la tasa de 5.3 Kbps no solo brinda buena calidad sino mayor flexibilidad a los diseñadores.
- **G.726:** Se trata de otro *códec* de audio, implementado con la recomendación G.726 de la ITU-T, que provee compresión a 64 Kbps y con velocidades de 16, 24, 32 y 40 Kbps, basados en el esquema de Modulación por Codificación de Impulsos Diferencial Adaptativa (*Adaptive Differential Pulse Code Modulation*, ADPCM) que en contraste con PCM, cuantifica la diferencia entre la señal y una predicción hecha a partir de la señal, por lo que se trata de una codificación diferencial, para descompresión y que se utiliza en aplicaciones como telefonía, buzón de voz, videoconferencia y VoIP.
- **G.728:** Describe una variación de bajo retardo de 16 Kbps de una compresión de voz con Predicción Lineal con Excitación por Código (*Code Excited Linear Prediction*, CELP), el cual se basa en procedimientos de búsqueda de análisis por síntesis, cuantización de vectores con pesos y predicción lineal.
- **G.729/G.729A:** Este estándar de compresión, creado bajo el esquema de Estructura Conjugada de Predicción Lineal Excitada por tabla de Códigos Algebraicos (*Conjugate Structure Algebraic Code Excited Linear Prediction*, CS-ACELP), se basa en el modelo de codificación CELP y entrega una calidad de voz similar a la conseguida con ADPCM de 32 Kbps, pero con sólo un cuarto de la velocidad de bit. Entonces, con solo 8 Kbps o lo que es igual, 10 ms como intervalo para muestreo (ver Figura 2 [1]), G.729 ofrece la oportunidad de mejorar significativamente el uso del ancho de banda y es el más indicado a utilizar en comunicaciones de VoIP dentro de entornos para Redes de Área Extensa (*Wide Area Network*, WAN).

El anexo G.729A es una versión de menor complejidad del *códec* para aplicaciones de Voz y Datos Simultáneos Digitales (*Digital Simultaneous Voice and Data*, DSVD) y es el que ofrece la mejor relación Complejidad/Calidad de la industria (ver Figura 3 [4]).



**Figura 2. Compresión de voz con G.729.** La cadena de voz analógica es digitalizada en tramas PCM, y así mismo entregadas al algoritmo de compresión en intervalos de 10 ms.



**Figura 3. Código G.729.**

- **G.729B/G.729AB:** Son *códecs* de audio implementados bajo la recomendación ITU-T G.729B y sus anexos A y B, que incluyen las potencialidades de técnicas como Detección de Actividad de Voz (*Voice Activity Detection*, VAD), Generador de Ruido de Confort (*Comfort Noise Generation*, CNG) y Transmisión Discontinua (*Discontinuous Transmission*, DTX), lo cual permite supresión de silencios. La detección de actividad de voz suprime la transmisión de datos durante los periodos de silencio, lo cual es muy útil ya que cuando una persona está hablando lo hace únicamente por momentos, reduciendo así hasta un 50% la demanda por ancho de banda.

Sin embargo, existen otro tipo de *códecs* fuera de la serie G de la ITU-T, entre los que se destaca los siguientes:

- **iLBC:** iLBC (*Internet Low Bitrate Código*) [5] es un *códec*, desarrollado para VoIP por Global IP Sound, cuya licencia es libre, así como su descarga, y del cual puede disponerse, incluso su código fuente, con ciertas restricciones por lo que se

presta para modificaciones. Fue diseñado para limitar el ancho de banda y utiliza una velocidad de transmisión de 13.33 Kbps con codificación de tramas de 30 ms, o 15.2 Kbps con tramas de 20 ms. Este *códec* permite degradar la calidad de la voz en los casos de pérdida de tramas lo cual ocurre en conexiones con pérdida o retraso de paquetes, y brinda mejores condiciones de calidad de la voz que los *códec*s G.723.1 y G.729A

- **AMR:** El *códec* para banda estrecha de voz Adaptativa en Tasa Binaria (*Adaptive Multi-Rate*, AMR) [6], estandarizado por el Instituto de Estándares de Telecomunicaciones Europeo, (*European Telecommunications Standards Institute*, ETSI) en 1999, fue creado para servicios en sistemas inalámbricos de tercera generación basados en el desarrollo del núcleo de red del Sistema Global para Comunicaciones Móviles (*Global System for Mobile Communications*, GSM) como Acceso Múltiple de Banda Ancha Por División De Código (*Wideband Code Division Multiple Access*, WCDMA), Tasas mejoradas de Datos para la Evolución Global de GSM (*Enhanced Data for GSM Evolution*, EDGE) ó Servicio de Radio de Paquetes Generales (*General Packet Radio Service*, GPRS). Utiliza un algoritmo de codificación que opera en señales de banda estrecha (200 – 3400 Hz) a velocidades de transmisión variables del rango de 4.75 a 12.2 Kbps. Incluye además funcionalidades de VAD, CNG y DTX, y lo mejor, puede aplicarse a VoIP.

Una variante de este *códec* es el AMR de Banda Ancha (*AMR Wide speech Bandwidth*, AMR-WB) que ofrece una calidad en las comunicaciones mejor aún que la obtenida en una RTPC, en aspectos de inteligibilidad y naturalidad de la conversación, lo que da la impresión de estar conversando frente a frente con la otra persona. Este *códec* utiliza la tecnología ACELP con lo que puede ofrecer varias velocidades de transmisión: 23.85, 23.05, 19.85, 18.25, 15.85, 14.25, 12.65, 8.85 y 6.6 Kbps. También incluye un modo de ruido de fondo diseñado para ser usado en operaciones DTX.

Se puede observar que la selección del *códec* en implementaciones que requieran la transmisión de voz juega un papel importante en su desempeño, por lo que debe tenerse muy en cuenta. En la Tabla 1 se reúnen los datos pertinentes a la tasa de pérdida de paquetes, el retardo y *jitter* máximos que tolera cada *códec*.

**Tabla 1. *Códec*s y sus características.**

<i>Códec</i>	Velocidad de bit (Kbps)	Carga útil (bytes)	Retardo de paquetización (ms)	Carga útil (bytes)	Retardo de paquetización (ms)	MOS <sup>2</sup>
G.711	64	160	20	240	30	4.1
G.723	6.3	24	24	60	48	3.9
G.723	5.3	20	30	60	60	3.65
G.726	16, 24, 32, 40	80	20	120	30	3.85 (32 Kbps)
G.728	15					3.61
G.729	8	20	20	30	30	3.92
iLBC	13.33	50	-	-	-	3.9
iLBC	15.2	38	-	-	-	4.42
AMR	12.2	-	-	-	-	4.01

<sup>2</sup> Nota Media de Opinión (*Mean Opinión Score*, MOS).

## 1.3 PROTOCOLOS Y ESTÁNDARES RELACIONADOS CON VoIP

Tal como ocurre con el resto de tecnologías, VoIP encierra muchos protocolos [7] cuyos principios son de ayuda en la comprensión de la generación, establecimiento y finalización de una llamada VoIP. Entre estos se encuentran:

### 1.3.1 Protocolos de Señalización

#### 1.3.1.1 H.323

Envuelve múltiples sub-protocolos desarrollados por la ITU para aplicaciones de videoconferencia, relacionados con la transmisión, establecimiento y señalización de llamadas, así como la disponibilidad de los recursos de red. Constituyó la base de los primeros sistemas de telefonía Internet y en la actualidad se utiliza con poca frecuencia por cuanto existen protocolos más eficientes y flexibles. Entre sus sub-protocolos se encuentran los de: Servicios de Acceso Remoto (*Remote Access Service*, RAS) para enrutamiento de llamadas; H.245 para el canal de control de llamada con el cual se mantiene negociación de capacidades que aseguren que las aplicaciones y los *códecs*, que manejan tanto el emisor como receptor de la llamada, sean compatibles; y el protocolo H.225 para configuración de llamadas en el que cada extremo involucrado en la comunicación guarda información concerniente al establecimiento y desarrollo de la misma. Además de estos, también utiliza dos protocolos con los que define los requerimientos esenciales para el transporte de datos empaquetados en tiempo real, los cuales son el Protocolo para Control de Transmisiones en Tiempo Real (*Real Time Control Protocol*, RTCP) y/o el Protocolo de Transporte en Tiempo Real (*Real Time Transport Protocol*, RTP).

H.323 maneja cuatro elementos importantes para un sistema de comunicaciones: *Gatekeepers* o proveedores inteligentes, Unidades de Control Multipunto (*Multipoint Control Unity*, MCU), Terminales y Pasarelas.

- Un *Gatekeeper* es el *host* que provee tanto el monitoreo centralizado de llamadas como la compatibilidad de señalización de los terminales H.323. Actúa en conjunción con varias pasarelas y se encarga de realizar tareas de autenticación de usuarios, control de ancho de banda, encaminamiento IP, etc.
- Una MCU es un dispositivo específico que permite sesiones de conferencia.
- Los Terminales, bien sean *software* o *hardware*, contienen una pila de elementos *software* que abarcan varios aspectos de la señalización de una llamada, como H.245 y H.225, además, hace uso de RTP y en ocasiones ofrece el protocolo T.120<sup>3</sup> para permitir aplicaciones de datos como *Netmeeting*. Los Terminales son libres de comunicarse con cualquier otro siempre que éste se encuentre en una zona específica (controlada por el *Gatekeeper*) dentro de la LAN.
- Una pasarela es el elemento encargado de servir de puente entre una RTPC y la red IP. Cuando un teléfono convencional trata de hacer una llamada IP, es precisamente una pasarela quien se encarga de convertir la señal analógica en un flujo de paquetes IP, y viceversa; por una parte se conecta a una central telefónica, y por la otra a una red IP. Para ello debe registrarse ante el

---

<sup>3</sup> Estándar para compresión de datos. T.120 define un “paraguas” de protocolos para transmisión de datos multimedia. Cubre también las conexiones multipunto y permite una gran variedad de medios físicos

*Gatekeeper* que controla la zona si las llamadas son enrutadas hacia sus interfaces.

### 1.3.1.2SIP

El Protocolo de Inicio de Sesión (*Session Initiation Protocol*, SIP) fue creado por la Fuerza de Trabajo en Ingeniería de Internet (*Internet Engineering Task Force*, IETF) para el manejo de conferencias multimedia sobre IP, definido inicialmente en febrero de 1996 en el RFC 2543, ahora obsoleto con la publicación del RFC 3261 en junio de 2002, el cual es compatible con el anterior excepto en aquellos aspectos que debían cambiarse para hacer de esta especificación una más clara [8].

La nueva estructura redefine la Máquina de Estados Finitos (*Finite State Machina*, FSM) en sus tres capas: Transporte, Transacción y Transacción de Usuario (*Transaction User*, TU). En el aspecto de seguridad, se removió la autenticación básica de Protocolo de Transferencia de Hipertexto (*Hypertext Transmission Protocol*, HTTP) para permitir el transporte de contraseñas, se cambió la encriptación denominada Privacidad Bastante Buena (*Pretty Good Privacy*, PGP) por el tipo de encriptación que se consigue a través de Extensiones Multipropósito Seguras para el Correo de Internet (*Secure Multipurpose Internet Mail Extensions*, S/ MIME), permitiendo mayor flexibilidad de enrutamiento para servicios y aplicaciones móviles. Además, el RFC 3261 soporta direccionamiento Internet versión 6 (*Internet Protocol version 6*, IPv6), e incluye nuevos campos en su encabezamiento como son *Alert-Info*, *Call-Info*, *Reply-To*, *In-Replay-To* y *Error-Info*. Por otro lado, se diferencia del primero en cuanto establece que todos los elementos de SIP utilicen tanto Protocolo de Datagramas de Usuario (*User Datagram Protocol*, UDP), como Protocolo de Control de Transmisión (*Transmission Control Protocol*, TCP), y no se limitan a UDP como se imponía en un principio.

SIP es un protocolo de señalización a nivel de aplicación para establecimiento y gestión de sesiones con múltiples participantes que se basa en mensajes de petición y respuesta utilizando muchos conceptos de estándares anteriores como HTTP y Protocolo Simple de Transferencia de Correo (*Simple Mail Transfer Protocol*, SMTP) para infundir sesiones de comunicaciones entre usuarios, aunque a diferencia de MGCP<sup>4</sup>, una llamada con SIP puede empezar y concluir sin el uso de agentes de llamadas. SIP hace posible iniciar, modificar y terminar sesiones interactivas multimedia como llamadas IP gracias a dos protocolos que son: RTP/RTCP y Protocolo de Descripción de Sesión (*Session Description Protocol*, SDP) el cual se usa para la negociación de las capacidades de los participantes, tipo de codificación, entre otros.

SIP se basa en el intercambio de señales las cuales se encuentran divididas en diez categorías denominadas métodos y cada uno de ellos cumple una función diferente según sea conveniente. La Figura 2 muestra algunos de éstos métodos obtenidos a través del analizador de protocolos Ethereal.

Entre las principales ventajas de SIP pueden destacarse que es ligero, portable y es capaz de soportar y proveer diferentes capacidades relacionadas con el enrutamiento de llamadas o como un servidor Proxy, entre otras.

Tanto los puntos extremos de la comunicación como los servidores SIP se denominan nodos, incluyendo los teléfonos SIP. Una llamada entre diferentes nodos que se

---

<sup>4</sup> Se explica en el ítem siguiente.



encuentren en el mismo servidor SIP de registro se considera local, sin importar la ubicación de los mismos. Sin embargo, cuando se trata de llamadas que no son locales se requiere de servidores SIP especializados, denominados SIP Proxy, para realizar las peticiones de enrutamiento, autenticación y autorización que hacen posible el establecimiento de la comunicación.



**Figura 4. Intercambio de primitivas entre dos equipos en la red de la Universidad del Cauca.**

Las señales de SIP y su función se encuentran en la Tabla 2.

**Tabla 2. Señales de SIP**

Señales SIP	Función
<i>INVITE</i>	Se utiliza para iniciar una sesión y anunciar las capacidades de los puntos extremos de la comunicación.
<i>ACK</i>	Se usa para reconocer que la persona llamada ha recibido el mensaje de <i>INVITE</i> con éxito.
<i>BYE</i>	Ocurre cuando la llamada finaliza.
<i>CANCEL</i>	Se utiliza cuando se presentan intentos que fuerzan solicitudes anteriores que aún no se han completado.
<i>OPTIONS</i>	Tiene lugar cuando se indagan las capacidades con que cuentan los nodos SIP pero sin establecer un canal para el enlace.
<i>REGISTER</i>	Notifica al servidor SIP los nodos que un usuario en particular puede alcanzar.
<i>INFO</i>	Es utilizado para transmitir señales a través de trayectos con señalización SIP.
<i>PRACK</i>	Este método provisional <i>ACK</i> se utiliza para notificar a un extremo de la comunicación, los intentos para establecer una llamada sin que se proporcione un mensaje <i>ACK</i> .
<i>SUSCRIBE</i>	Proporciona la manera de establecer eventos dentro de aplicaciones de telefonía SIP, como por ejemplo indicarle a un usuario que alguien en particular se ha registrado con el servidor.
<i>NOTIFY</i>	Envía mensajes entre los extremos de la comunicación cuando ocurre un evento.

### 1.3.1.3MGCP/Megaco

El Protocolo de Control de Pasarelas hacia los Medios (*Media Gateway Control Protocol*, MGCP) y Megaco/H.248 se diseñaron para proveer una arquitectura donde elementos de comunicación específicos y pasarelas telefónicas puedan ser añadidos a una red VoIP. En este caso, una arquitectura que utilice estos protocolos coincide estrechamente con los servicios que presta una RTPC.

MGCP es un protocolo de señalización de primera generación definido por la IETF y descrito en el RFC 2705, que ubica el control de señalización de las llamadas así como el procesamiento de la inteligibilidad de la voz sobre agentes de llamadas o controladores de pasarelas de los medios de comunicación. Al igual que un *Gatekeeper* en H.323, los agentes de llamadas de MGCP realizan las mismas funciones de enrutamiento de llamadas.

Megaco es un protocolo que describe un conjunto de estándares para funciones de señalización desarrollado colectivamente por la IETF, con su RFC 3015, y por la ITU con su recomendación H.248 (ambas publicaciones son idénticas). Dependiendo de su implementación, las pasarelas Megaco pueden soportar estándares de tecnologías de señalización usados en una RTPC como Tono Dual de Multifrecuencia (*Dual Tone Multi Frequency*, DTMF), Sistema de Señalización Número 7 (*Signaling System Number 7*, SS7) y Red Digital de Servicios Integrados (RDSI), así como protocolos característicos de redes basadas en paquetes tales como TCP/IP, Modo de Transferencia Asíncrono (*Asynchronous Transfer Mode*, ATM) y Frame Relay.

## 1.3.2 Protocolos de Transporte

### 1.3.2.1RTP

RTP es un protocolo definido en el RFC 3550 orientado a la transmisión de información en tiempo real, como la voz o el video, que pertenece a las capas superiores de usuario y

funciona sobre UDP, el cual cambia confiabilidad por velocidad para mejorar el manejo de transmisiones en tiempo real como VoIP, haciendo uso de los servicios de *checksum*<sup>5</sup> y multiplexación, para proporcionarle a los programas que generan este tipo de datos, un manejo de transmisiones en tiempo real a través de difusiones *unicast* o *multicast*. Los paquetes RTP no contienen campo de longitud ya que al funcionar sobre UDP, este protocolo es quien encapsula la voz comprimida en datagramas y aunque RTP no es lo suficientemente confiable por si solo, proporciona mecanismos que garantizan una mayor confiabilidad.

A pesar de que TCP es un protocolo de transporte de grandes volúmenes de información, éste y otros protocolos como Protocolo de Transferencia Expresa (*Express Transfer Protocol*, XTP) resultan inapropiados para el transporte video y voz por tres razones básicas:

- El hecho de que ante la pérdida de paquetes este tipo de protocolos emplean retransmisión de paquetes. TCP no soporta *multicast*.
- El control de congestión de TCP hace reducir la ventana de transmisión cuando detecta pérdida de paquetes, y el audio y el video son aplicaciones cuya transferencia no permite disminuciones de este tipo.
- Adicionalmente los encabezados de estos protocolos son más largos que los de RTP.

Por otro lado, RTP hace uso de RTCP para proporcionar una retroalimentación sobre la calidad de distribución y la congestión, con miras a monitorear la calidad y diagnosticar los problemas que pueda presentar la red. Además de esto, RTCP sincroniza el audio y el video, conoce el número de usuarios presentes en una conferencia y calcula la velocidad a la cual deben ser enviados los paquetes; todas estas opciones son obligatorias cuando RTP se usa en entornos *multicast* IP. Pero existe otra aplicación opcional y es una para administración de sesiones con bajo manejo de información de control para aquellas aplicaciones donde hay uso masivo de usuarios entrando y saliendo constantemente.

RTP utiliza *códecs* para la compresión, con lo que reduce de 64 Kbps hasta 8 Kbps la velocidad de transmisión para digitalización y compresión de voz, produciendo un desmejoramiento en la calidad de la voz poco perceptible; además de esto usa H.323, G.729 y procedimientos adicionales más para transmisiones en tiempo real.

RTP es puede trabajar sobre redes de alta velocidad como ATM sin ningún problema, también en redes asimétricas como Líneas de Suscriptor Digital Asimétrico (*Asymmetric Digital Subscriber Line*, ADSL), cable-módem o por enlace satelital, pero cumpliendo con ciertas características de ancho de banda para ambas direcciones y uso exclusivo para la aplicación RTP.

La Figura 5 muestra la forma en que está constituido un encabezado RTP, cuyos campos son:

- V (version): es un campo conformado por 2 bits que identifican la versión de RTP. La versión definida por la especificación actual es la 2.

---

<sup>5</sup> Suma de chequeo: esquema simple de detección de errores, donde cada mensaje transmitido es acompañado con un valor numérico basado en el número de grupo de bits del mensaje.

- P (*padding*): si este bit está habilitado, el paquete contendrá uno o más octetos de relleno que no hacen parte de la carga útil, y se caracteriza porque el último octeto cuenta con un contador que indica cuantos octetos de relleno se deben ignorar, incluyendo el mismo. El relleno es usado por algunos algoritmos de encriptación.
- X (*extension*): cuando este bit se encuentra habilitado, entonces al encabezado fijo le sigue una extensión del encabezado. Este mecanismo posibilita implementaciones para añadir información al encabezado RTP.
- CC (CSRC<sup>6</sup> *Count*): son cuatro bits que contienen el número de identificación del CSRC que sigue el encabezado fijo. Si la cuenta CSRC es cero, entonces la fuente de sincronización es la fuente de la carga útil.
- M (*marker*): un bit de marcador definido por el perfil particular de media.
- PT (*payload type*): es un campo de 7 bits que identifica el formato de la carga útil. Los mapeos de carga útil para audio y video están especificados en el RFC 1890.
- Número de secuencia (16 bits): incrementa su valor en 1 cada vez que se envíe un paquete que identifica la posición de este en la secuencia de paquetes y puede utilizarse en el receptor para detectar pérdida de paquetes y para reiniciar la secuencia de los paquetes.
- Timestamp (32 bits): refleja el instante de muestreo del primer byte en la carga útil. Varios paquetes consecutivos pueden tener el mismo *timestamp* si son lógicamente generados al mismo tiempo, por ejemplo, si todos son parte de la misma trama de video. Dicho tiempo de muestreo debe incrementar de manera monótona y lineal para fines de sincronismo y de cálculo de *jitter*.
- SSRC<sup>7</sup> (32 bits): identifica las fuentes de sincronismo. Si la cuenta CSRC es cero, entonces la fuente de carga útil es la fuente de sincronización. Si la cuenta CSRC es distinta a cero, entonces el SSRC identifica el mezclador.
- CSRC (32 bits cada uno): identifica las fuentes contribuyentes para la carga útil. El número de fuentes contribuyentes está indicado por el campo de la cuenta CSRC.

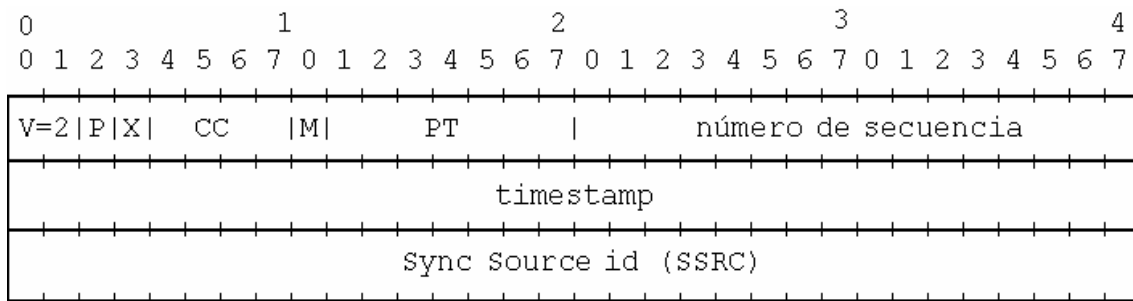


Figura 5. Encabezado RTP

### 1.3.2.2 RTCP

Este protocolo proporciona información de control asociado a flujos de datos para aplicaciones multimediales. Trabaja junto con RTP para llevar a cabo tanto el transporte como empaquetamiento de este tipo de datos, más no lo hace por sí mismo, sin embargo, su función principal consiste en informar la calidad de servicio proporcionada por RTP. Además, recoge estadísticas relacionadas con la conexión, como son paquetes enviados, paquetes recibidos, paquetes perdidos, *jitter*, entre otros, lo cual puede utilizarse para

<sup>6</sup> Fuente de Contribución para RTP (Contributing source).

<sup>7</sup> Fuente de Sincronización para RTP (Synchronization source.)

incrementar la calidad de servicio, ya sea limitando el flujo de datos o mediante *códecs* de compresión más baja.

Entre otras funciones se encuentran:

- Informar sobre el comportamiento de una aplicación, lo cual es muy útil para aquellas que sean de velocidad adaptativa, pues permite la reducción de la congestión mediante el un esquema de compresión más agresivo o enviar un flujo de más alta calidad cuando hay poca congestión. También puede resultar útil para diagnosticar problemas de red.
- Correlacionar y sincronizar distintos tipos de tráfico generados por un mismo emisor.
- Transferir la identidad de un emisor a través de un paquete de descripción.

Un aspecto interesante relacionado con VoIP es la tendencia a introducir este tipo de servicios en redes de telefonía celular y otros ambientes inalámbricos, por lo que resulta conveniente estudiar tales tecnologías con el propósito de visualizar el verdadero potencial que ofrece su convergencia.

## **1.4 TELEFONÍA CELULAR**

El desarrollo que han tenido las comunicaciones móviles se basa en una sucesión de fases bien diferenciadas en donde en sus comienzos la Telefonía Móvil Automática Analógica fue únicamente un producto elitista, para determinados sectores de la sociedad y nichos profesionales, y supuso el origen de lo que serían posteriormente las comunicaciones móviles presentando escasas prestaciones y altos costos. Posteriormente, con la llegada de la segunda generación (2G) y la introducción de GSM se lograron economías de escala asociadas a la mayor capacidad proporcionada por esta tecnología y la adopción de la misma por un gran número de operadores en todo el mundo. Después, la tercera generación (3G) dio apertura a nuevas posibilidades de servicios y aplicaciones, basados en las capacidades nativas de tecnologías como el Sistema de Telecomunicaciones Móviles Universales (*Universal Mobile Telephone System*, UMTS) y CDMA2000. Finalmente, según investigaciones realizadas en los últimos años se espera que la llamada cuarta generación (4G) esté formada por la integración de las redes basándose por completo en los protocolos TCP/IP, en la promesa de las nuevas redes de acceso radio y las redes 3.5 G, coexistiendo de forma coordinada con las tecnologías actuales, con nuevos servicios y con terminales cada vez más fascinantes y versátiles.

Pero sin importar el tipo de tecnología, todo sistema de telefonía celular tiene como objetivos:

- Contar con alta capacidad de soportar tráficos provenientes de un gran número de usuarios dentro de una zona determinada.
- Hacer uso eficiente del espectro asignado.
- Tener capacidad de adaptación a la densidad de tráfico ya que éste varía dependiendo de la ubicación dentro de un área de servicio.
- Ser compatible con los estándares, protocolos y normas tanto de la tecnología usada como de las regulaciones del país donde opera.

- Contar con la facilidad de extensión (*roaming*) así como la capacidad de soportar QoS.
- Ser accesible a los usuarios.

Con el fin de cumplir con estos objetivos se hace necesario conocer algunos conceptos relacionados con la tecnología celular los cuales se explicarán brevemente a continuación.

### 1.4.1 Reutilización de Frecuencia y División en Celdas

El área de cobertura de un sistema celular se divide en celdas [9], cada una de las cuales corresponde a una zona cubierta por un transmisor (o en algunos casos, varios transmisores) cuyo tamaño depende de la potencia que éste radie, la banda de frecuencia utilizada, altura, posición y tipo de antena, así como de la topografía del terreno y de la sensibilidad de los equipos receptores.

Un canal de radio consiste en un par de frecuencias, una en cada dirección de transmisión, que son usadas para una operación *full-duplex*. Un canal de radio en particular,  $F_1$ , es usado en una zona geográfica llamada celda  $C_1$ , con un radio de cobertura  $R$ . Este mismo canal puede ser usado en otra celda con el mismo radio de cobertura a una distancia de separación  $D$  (ver Figura 6).

De esto se trata la reutilización de frecuencias, utilizar las mismas frecuencias portadoras para cubrir diferentes áreas superadas por una distancia suficiente para evitar interferencia co-canal.

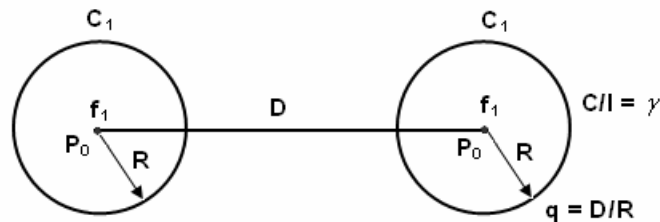


Figura 6. Re-uso de frecuencias.

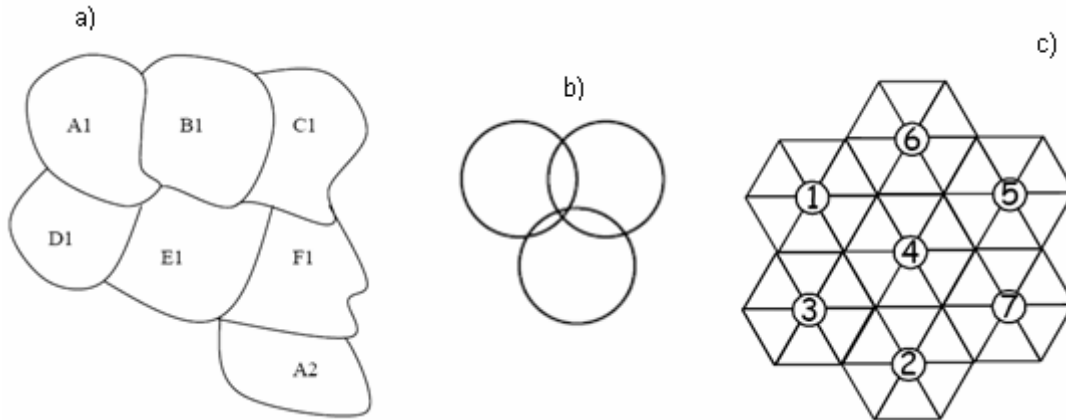
En lugar de cubrir una sola área de servicio, desde un único sitio de transmisión con antenas muy elevadas y de mucha potencia, dicha área se divide en otras menores denominadas celdas, en donde se ubica un transmisor de menor potencia, consiguiendo además, mejorar la capacidad del sistema, ya que la división en celdas permite concentrar mayor número de canales en las zonas de mayor demanda [10].

Aunque no es necesario que el área de cobertura de los sitios de transmisión sea regular y las celdas no necesitan tener una forma geométrica definida, se requiere de cierto grado de confinamiento geográfico del canal para evitar la interferencia co-canal.

Tomando una demanda equilibrada si se tienen  $N$  canales asignados y se divide en  $K$  celdas, entonces cada celda tendrá  $S=N/K$  canales. Con el fin de trabajar apropiadamente un sistema celular debe seguirse dos condiciones:

- El nivel de potencia del transmisor dentro de una celda debe estar limitado con el fin de reducir la interferencia entre transmisores de celdas vecinas.

- Celdas vecinas no pueden compartir los mismos canales y con el fin de reducir la interferencia las frecuencias pueden ser re-utilizadas siguiendo ciertas reglas.



**Figura 7. a) Celdas Amorfas. b) Celdas formadas con antenas isotrópicas. c) Ejemplo de cluster con  $K = 7$**

Las zonas amorfas (Figura 7a) son aceptables en aquellas situaciones donde el sistema de distribución de celdas no se modifique en el futuro, lo cual no ocurre en la práctica y por ello es necesaria una estructura geométrica para facilitar adaptaciones de acuerdo al crecimiento del tráfico. Por otro lado, si se ubica una antena isotrópica en medio de una celda (Figura 7b) la misma tendrá una forma circular y será entonces una celda omnidireccional, presentando zonas solapadas o zonas sin cobertura.

Por tales razones y por cuestiones relacionadas con el dibujo y relaciones geométricas, los diseñadores de sistemas de los laboratorios Bell adoptaron la forma de hexágono (Figura 7.c) pues en el caso de presentarse matrices de celdas no existirán solapamientos ni espacios vacíos.

El área conformada por  $K$  celdas adyacentes que utilizan canales diferentes se denomina *cluster*.

Como se observará más adelante, los estándares de Wi-Fi manejan una serie de canales, según su frecuencia de operación, por lo que los conceptos de reutilización de frecuencias y división de celdas resultan provechosos y pueden aplicarse con miras a mejorar la capacidad de un sistema WLAN.

### 1.4.2 Factor de Reducción de Interferencia co-canal

La interferencia co-canal en sistemas celulares no se puede combatir a través de uso de filtros ya que la misma frecuencia es utilizada al mismo tiempo por varias celdas, por lo que una separación geográfica puede reducir dicha interferencia. Esto es el factor de reducción de interferencia co-canal, o tasa de re-uso co-canal  $q$ , dado por la relación:

$$q = D/R$$

Este factor tiene un impacto sobre la calidad de transmisión y la capacidad del sistema. Entre mayor sea la relación  $D/R$  (ver Figura 5) menor será la interferencia co-canal y, por tanto, habrá mejor calidad en la transmisión. Si por el contrario esta relación es pequeña,

la capacidad del sistema se verá aumentada debido a que la cantidad de canales asignados a una celda será mayor.

### 1.4.3 Distancia de Reutilización de Frecuencia

La distancia mínima para la reutilización de frecuencia depende, como se puede apreciar en la Figura 8, de muchos factores, entre los cuales se encuentran el número de celdas co-canales que rodean la celda central, la geografía del terreno circundante, la altura de las antenas y la potencia de transmisión de cada celda.

La distancia  $D$  de reutilización de frecuencia viene dada por la ecuación:

$$D = \sqrt{3K} \times R$$

donde  $K$  es el número de celdas que posee el *cluster* y  $R$  el radio de las celdas.

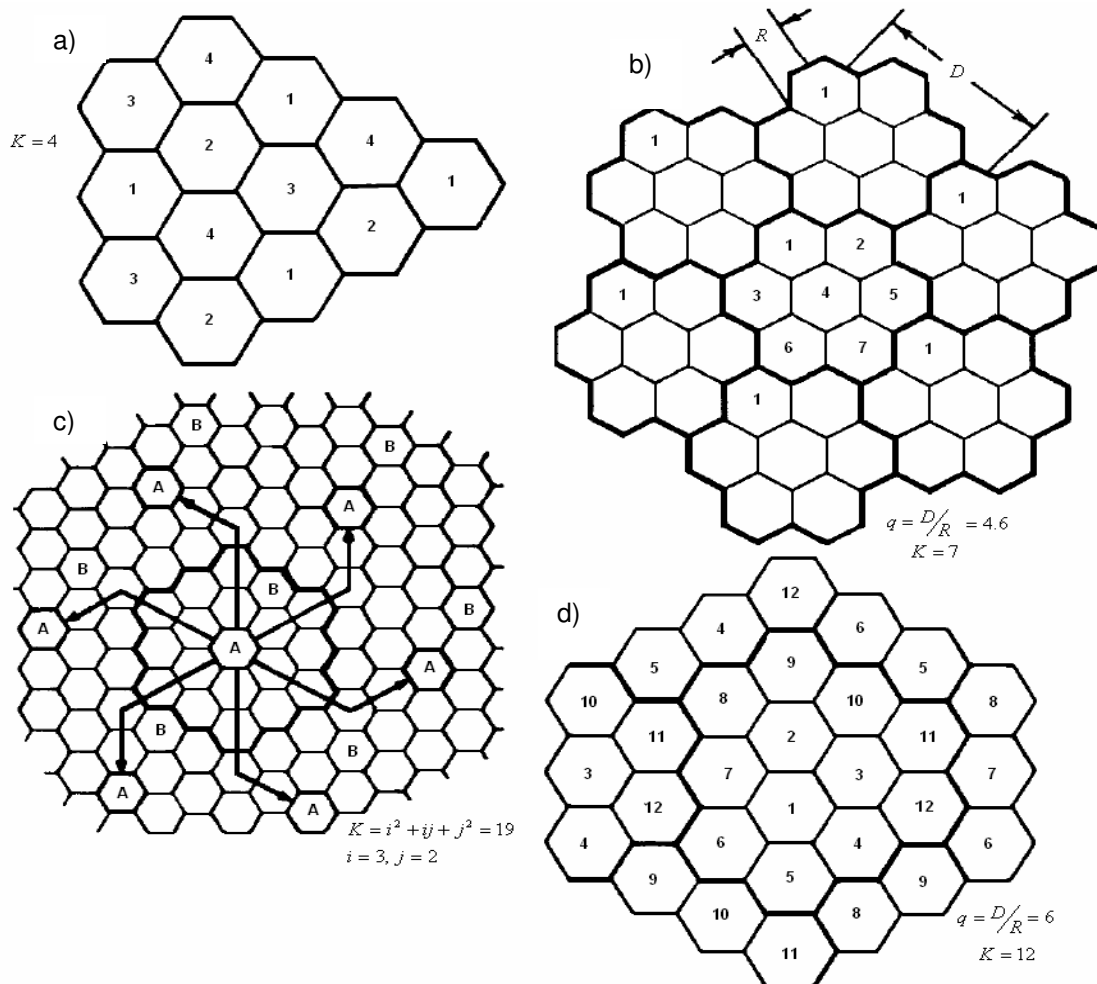


Figura 8. Patrón de re-uso con  $N$  celdas.



Si se establece que todas las estaciones base (EB) transmiten con la misma potencia, un aumento de  $K$  produce un incremento de la distancia  $D$  (distancia entre celdas co-canales), siempre y cuando el radio  $R$  de la celda se mantenga. Este incremento en  $D$  reduce la posibilidad de que se produzca interferencia co-canal. Sin embargo, cuando  $K$  es muy grande, el número de canales asignado a cada una de las  $K$  celdas se hace pequeño, ya que la cantidad de usuarios que puedan comunicarse simultáneamente en cada celda será muy escasa.

Esto implica encontrar un valor apropiado para  $K$  con el cual cumplir los requerimientos de rendimiento del sistema, por lo que es necesario contar con un estimado de la interferencia co-canal y seleccionar la mínima distancia  $D$  para reducirla.

#### 1.4.4 Celdas con canales iguales

Para ubicar las celdas y sus respectivos canales en los diferentes *clusters* se utilizan los parámetros de desplazamiento  $i, j$ , enteros, con  $i > j$ .

Existe un método práctico para conseguirlo: se toma una celda como referencia denominada A (ver Figura 8.c), se cuentan  $i$  celdas a lo largo de la cadena del hexágono partiendo de uno de los lados de A, luego se gira  $60^\circ$  en sentido levógiro y se cuentan  $j$  celdas más. Entonces, la celda referencia y esta última son celdas co-canal. También pueden encontrarse realizando el proceso contrario.

De esta forma el número de celdas por *cluster*  $K$  que determina cuántos conjuntos de canales deben ser formados viene dado por:

$$K = i^2 + ij + j^2$$

Por ejemplo, para el caso en que  $i = 2, j = 1$ , se tendría que  $K = 7$ , mientras que para los valores de  $i = 3, j = 2$  se obtiene que  $K = 19$ , tal como puede apreciarse en la Figura 8b y Figura 8c, respectivamente.

#### 1.4.5 Tipos de Celda

Debido a que la densidad de usuarios varía en cada área de cobertura, se hace necesario utilizar distintos tipos de celdas:

- **Macrocelas:** Son celdas grandes, para áreas con población dispersa.
- **Microcelas:** Estas celdas son usadas para áreas densamente pobladas. Dividiendo las zonas en pequeñas áreas, el número de canales disponibles aumenta y por lo tanto la capacidad de las celdas. El nivel de potencia de los transmisores usados en estas celdas es menor, reduciendo la posibilidad de interferencia entre celdas vecinas.
- **Celdas Selectivas:** No siempre es de utilidad definir celdas con una cobertura de 360 grados. En algunos casos son necesarias celdas con una forma particular de cobertura. Un ejemplo típico de celdas selectivas son las ubicadas a la entrada de un túnel donde la cobertura de 360 grados no es necesaria. En ese caso se usa una celda selectiva con una cobertura de 120 grados.
- **Celdas Paraguas:** Un camino, tipo autopista, puede cruzar pequeñas celdas produciendo así un gran número de *handoffs* entre diferentes celdas vecinas. El

nivel de potencia dentro de una celda paraguas aumenta en comparación con la potencia usada en una microcelda. Cuando la velocidad del móvil es muy alta, el móvil es manejado por la celda paraguas. El móvil estará luego en la misma celda, reduciendo así la cantidad de *handoffs* realizados en la red. Las características de propagación del móvil ayudan a visualizar y detectar la elevada velocidad.

#### 1.4.6 Radio de Celda

Resultados empíricos [9] muestran que la relación  $S/N > 18dB$  dan una calidad de servicio muy buena. Una de las posibilidades es tomar un radio máximo tal que la relación  $S/N$  sea  $>$  que  $18 dB$  en el 90 % del área cubierta. La propagación de energía en estas frecuencias depende de varios factores como topografía del terreno, altura de las antenas, etc. El radio mínimo está determinado por limitaciones técnicas en los procesos de *handoff* y de instalación de equipamiento.

#### 1.4.7 Asignación de Canales

En el diseño de sistemas celulares, además de la interferencia co-canal, se debe prestar atención a la interferencia por canales adyacentes por lo que no se asignan este tipo de canales dentro de la misma celda.

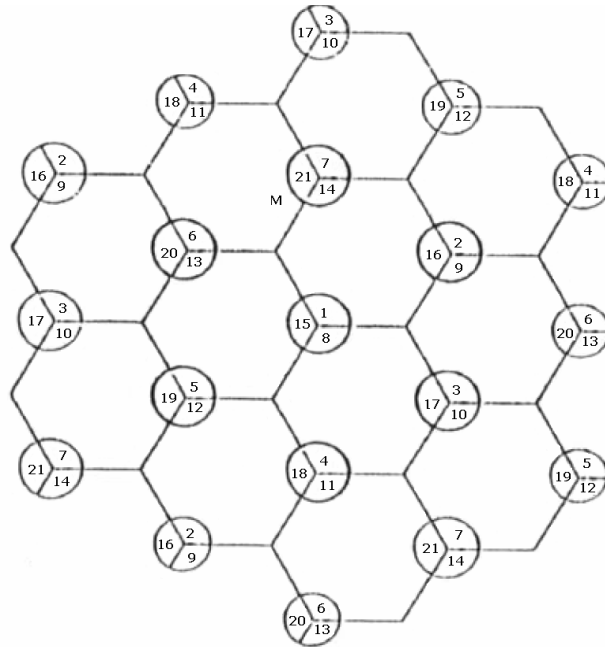
Al suponer que los canales están numerados secuencialmente desde uno en adelante y que el espectro asignado se divide en  $K$  juegos de canales, luego el juego  $k$  con  $1 \leq k \leq K$  contendrá los canales  $k, k + K, k + 2K$ , etc. y en varios casos para evitar la interferencia entre canales adyacentes se prohíbe el uso de éstos canales en celdas adyacentes (antenas omnidireccionales). Como ejemplo, para  $K = 7$  se tiene el total de los canales divididos en 7 y a su vez, en 3 subgrupos dentro de cada celda. Lo que hace un total de 21 subgrupos. Sin embargo, para evitar canales adyacentes en celdas adyacentes se recurre a la Relación Frente-Espalda (*Front to Back Ratio*, FBR) de las antenas direccionales como se observa en la Figura 9.

#### 1.4.8 Utilización del Espectro de Frecuencia

Debido a que el espectro de radio-frecuencia es limitado en un sistema de radio móvil, el principal desafío es utilizar el espectro de la forma más eficiente posible. Para lograrlo se deben tener en cuenta varios factores como la topología del área en la cual se quiere prestar servicio, ya que de ésta depende como se realiza la reutilización de frecuencias; y la gestión de frecuencias, que involucra la asignación de canales en celdas diferentes. Además de estos factores, existen otras técnicas para el incremento de la eficiencia del espectro de frecuencia tales como disminución de la banda de frecuencia, establecimiento (*set-up*) de llamada fuera de aire, colas de espera, redireccionamiento de llamadas, y que se clasifican como:

- Incremento del número de canales de radio mediante el uso de banda angosta, espectro expandido o división temporal.
- Mejora en la separación espacial en el re-uso del espectro de frecuencias.
- Manejo de frecuencia y asignación de canales.
- Mejora temporal de la eficiencia del espectro.
- Reducción de la carga de llamadas inválidas.

Algunas de estas técnicas pueden ser implementadas en otro tipo de redes inalámbricas, como es el caso de las WLANs. Sin embargo, existen ciertas diferencias que hacen necesario un estudio previo el cual permita denotar los aspectos que pueden aprovecharse para conseguir de ese modo mejores resultados.



**Figura 9. Relación Frente-Espalda para canales adyacentes**

## 1.5 Wi-Fi

Con Wi-Fi se hace referencia al conjunto de variantes de la tecnología inalámbrica del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos IEEE 802.11 (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*, IEEE) a través de la cual se crean soluciones para WLAN [11] que surgen por problemas que se presentan cuando la infraestructura de comunicaciones basada en esquemas cableados tradicionales no es factible debido a factores técnicos o económicos. Wi-Fi se constituye en sí misma como una alternativa de rápida construcción y puesta en marcha en un gran número de escenarios y aplicaciones como redes temporales, interconexión de LANs y creación de *hotspots*<sup>8</sup>, por nombrar algunos.

El comité IEEE 802.11 es el encargado de desarrollar los estándares, para este tipo de redes, que se basan en el mismo marco de protocolos que Ethernet y que define el uso de dos de los niveles más bajos de la arquitectura de Interconexión de Sistemas Abiertos (*Open System Interconnection*, OSI), el nivel físico y el nivel de enlace, especificando su funcionamiento en una WLAN. Con esto se garantiza una interoperabilidad excelente y se asegura una implementación sencilla de las funciones y dispositivos de interconexión Ethernet/WLAN.

<sup>8</sup> Un *hotspot* hace referencia a una zona cubierta por uno o más puntos de acceso inalámbricos públicos en donde los usuarios pueden conectarse a Internet y, para el interés de este proyecto, realizar comunicaciones de VoIP.

### 1.5.1 Arquitectura IEEE 802.11

Respecto a la arquitectura interna que se maneja en una red 802.11, ésta se basa en la creación de celdas que se constituyen como áreas geográficas en las que se instalan equipos que luego se interconectan a través de un medio aéreo, y que se compone, básicamente, por estaciones y un único punto de acceso.

Las estaciones son adaptadores que permiten la conversión de información existente en terminales o equipos clientes, que generalmente se encuentra encapsulada bajo el protocolo Ethernet, así como su envío y recepción dentro de la celda. El punto de acceso es el dispositivo capaz de gestionar todo el tráfico de las estaciones y que puede comunicarse con otras celdas o redes.

Para ello se establece el Conjunto de Servicio Básico (*Basic Service Set*, BSS) que permite la configuración con la cual es posible comunicar, a nivel de enlace, los equipos tanto de su celda de cobertura, como con otras redes a las cuales esté conectado. El BSS es, por tanto, una entidad independiente que puede tener su vinculación con otros BSS a través del punto de acceso mediante un Sistema de Distribución (*Distribution System*, DS). El DS puede ser cableado (con otros BSS a través de cable como el caso de una red Ethernet fija convencional), o también inalámbrico, en cuyo caso se denomina Sistema de Distribución Inalámbrica (*Wireless Distribution System*, WDS).

Sobre este concepto básico surge una serie de alternativas:

- Modo Ad-hoc o Conjunto de Servicio Básico Independiente (*Independent Basic Service Set*, IBSS): Es una celda inalámbrica en la cual no hay APs y, por tanto, no tiene conexión con otras redes. Las funciones de coordinación son asumidas de forma aleatoria por una de las estaciones presentes. El tráfico de información se lleva a cabo directamente entre los dos equipos implicados, sin tener que recurrir a una jerarquía superior centralizadora, obteniéndose un aprovechamiento máximo del canal de comunicaciones. La cobertura se determina por la distancia máxima entre dos equipos, la cual suele ser apreciablemente inferior a los modos en que hay un punto de acceso. Es un modo de empleo poco frecuente por las connotaciones de aislamiento que conlleva aunque puede ser muy útil cuando el tráfico existente se reparte entre todos los equipos presentes.
- Modo infraestructura: El AP realiza las funciones de coordinación, de modo que todo el tráfico tiene que atravesarlo generando así pérdida de eficiencia cuando dos estaciones dentro de un mismo BSS desean comunicarse entre sí (los paquetes de información son enviados una vez al AP y otra vez al destino). Es una arquitectura apropiada cuando la mayor parte del tráfico se origina o finaliza en las redes exteriores a las cuales está conectado el AP. Éste es el modo que se emplea habitualmente para conectar una red inalámbrica con redes de acceso a Internet y LANs.
- Conjunto de Servicio Básico Extendido (*Extended Service Set*, ESS): Es un caso específico del modo infraestructura, representado por un conjunto de BSS asociados mediante un sistema de distribución. Esto permite una serie de prestaciones avanzadas opcionales como el *roaming* entre celdas.

Para identificar a las celdas inalámbricas, se les asigna un nombre de red, que consiste en una cadena con longitud máxima de 32 caracteres, denominado Identificador de Conjunto de Servicio (*Service Set Identifier*, SSID). Para poder agregarse a una

determinada celda es requisito indispensable que el equipo tenga en su configuración interna el mismo SSID. Si se desea que la estación se conecte a cualquier celda inalámbrica presente, se deberá poner como parámetro “ANY”, con lo cual el equipo analizará todas las celdas que están presentes y se conectará a una de ellas adoptando su SSID.

Antes de dar inicio con la descripción de los estándares de la familia IEEE 802.11 es necesario describir brevemente la función del nivel físico de esta familia (PHY). A pesar de que cada estándar opera bajo un esquema de modulación diferente, la función del nivel físico es la misma. Básicamente, su funcionamiento depende de dos constantes: el preámbulo, cuya principal función es permitir la sincronización entre estaciones así como delimitar la trama; y el encabezado, el cual especifica la modulación utilizada, la tasa de transferencia de bits y el tamaño de la carga proveniente del nivel MAC. Estas constantes hacen parte del Procedimiento de Convergencia sobre el Nivel Físico (*Physical Layer Convergence Procedure*, PLCP) cuyo propósito es permitir el correcto mapeo de la información proveniente de la capa MAC. La velocidad con la que se transmitan estas constantes así como su tamaño, influyen en su tiempo de transmisión por lo que usualmente la transmisión del preámbulo y del encabezado se expresa en función de tal tiempo. En particular, el estándar 802.11b define dos preámbulos, uno largo de 192 bits y uno corto de 96 bits.

La Tabla 3 a continuación muestra el tiempo de transmisión de estas constantes para los diferentes estándares.

**Tabla 3. Longitud de PLCP y encabezado para la familia de estándares IEEE 802.11 [12][13][14].**

	802.11a	802.11b	802.11g (solamente)	802.11g ( <i>legacy</i> ) <sup>9</sup>
Longitud del preámbulo y del encabezado (µs)	20	192 (largo) 96 (corto)	20	20
Tasa de Transferencia de Datos Mínima Obligatoria (Mbps)	6	1	6	1

### 1.5.2 IEEE 802.11

Publicado en 1997, este fue el primero de los estándares definidos por el IEEE para aplicaciones WLAN, y que se diseñó para funcionar sobre la banda ISM que se ubica en los 2.4 GHz (2400 – 2483.5 MHz) con dos tipos de técnicas de espectro ensanchado: Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (*Direct Sequence Spread Spectrum*, DSSS) y Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencia (*Frequency Hopped Spread Spectrum*, FHSS).

DSSS utiliza, en banda base, Modulación Diferencial de Fase Binaria (*Differential Binary Phase Shift Keying*, DBPSK) y Modulación Diferencial de Cuadratura de Fase (*Differential cuadroPhase Shift Keying*, DQPSK) para proveer velocidades de transmisión de 1 Mbps y 2 Mbps, respectivamente. Funciona transmitiendo simultáneamente por varias frecuencias diferentes por lo que se incrementa la probabilidad de que los datos

<sup>9</sup> Se hace uso del término *legacy* cuando la red cuenta con equipos 802.11b y 802.11g

transmitidos lleguen a su destino. Además, los patrones de bits redundantes, llamados *chips*, se incluyen en la señal. En cualquier momento, se reciben partes de la señal simultáneamente en las distintas frecuencias en el receptor, y para poder recibir y decodificar la señal completa de modo satisfactorio, la estación receptora debe conocer el patrón de decodificación correcto. Realizar el seguimiento y la decodificación de los datos durante la transmisión es extremadamente difícil.

FHSS, la segunda técnica importante de transmisión de espectro de ensanchado, es de hecho una señal de banda estrecha que cambia la frecuencia de un modo rápido y continuo.

El inconveniente del DSSS en relación con el FHSS es que resulta más vulnerable a las interferencias de la banda estrecha.

Además, este estándar era capaz de alcanzar una velocidad de transmisión entre 1 y 2 Mbps, pero más tarde fue abolido por la aparición de una serie de variantes que mejoraron varios aspectos, entre los cuales se hallan la velocidad de transferencia, cobertura, seguridad e integración con redes cableadas.

### **1.5.3 IEEE 802.11b**

A diferencia del primer estándar éste maneja DSSS con un algoritmo de Codificación por Código Complementario (*Complementary Code Keying*, CCK), lo que le permite ofrecer un flujo de datos de hasta 11 Mbps sobre la banda de los 2.4 GHz. A través del Cambio Dinámico de Velocidad (*Dynamic Rate Shifting*, DRS) es posible que los adaptadores de red inalámbricos puedan reducir las velocidades para compensar los problemas relacionados con la recepción, causados por la propagación y los obstáculos que se hallen en el trayecto. Además, dependiendo de la velocidad aplicada se determina la distancia a cubrir, factor que depende también del número de usuarios conectados, tipos de antenas y de amplificadores que se vayan a utilizar.

Otros aspectos interesantes de este estándar son su reducción de consumo de potencia, lo cual permite su implementación en computadores portátiles y en Asistentes Digitales Personales (*Personal Digital Assistant*, PDA), y el soporte para tres canales sin solapamiento.

También utiliza el protocolo MAC mediante el método de Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisión (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*, CSMA/CA) el cual se explicará más adelante.

Sin embargo, 802.11b carece de QoS y presenta problemas de interferencia debido a la banda en que opera.

### **1.5.4 IEEE 802.11a**

Ratificado en 1999 y conocido como Wi-Fi5 funciona sobre la banda de los 5 GHz (5150 – 5350 y 5470 – 5725 MHz) utilizando Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*, OFDM) como técnica de modulación de radio, la cual permite dividir una portadora de datos de alta velocidad en 52 subportadoras de baja velocidad que se transmiten en paralelo. Estas subportadoras se pueden agrupar de un modo más integrado comparado con la técnica de espectro que utiliza 802.11b.

Además, se cuenta con el funcionamiento de ocho canales sin solapamiento<sup>10</sup> lo que favorece el aumento de la capacidad para las comunicaciones simultáneas.

El ancho de banda total disponible en la banda de 5 GHz también es mayor que en la banda de 2,4 GHz (300 MHz y 83,5 MHz respectivamente). De este modo, una WLAN basada en 802.11a puede admitir un mayor número de usuarios de alta velocidad simultáneos sin peligro de que surjan conflictos. Un inconveniente de utilizar la banda de 5 GHz es que las frecuencias utilizadas no están estandarizadas internacionalmente.

Alcanza velocidades de hasta 54 Mbps dentro de los estándares de IEEE, y hasta 72 y 108 Mbps con tecnologías de desdoblamiento de la velocidad ofrecida por diferentes fabricantes. Sin embargo, a pesar de su velocidad y de ventajas como el que no se requiere pagar por el uso de la banda en que opera y por las escasas interferencias en la misma, sucede que (al no estar reflejados los requisitos europeos ETSI en el estándar 802.11a) es incompatible<sup>11</sup> con los estándares 802.11b y 802.11g, no incorpora QoS, posee mayor nivel de consumo y la frecuencia que utiliza no se encuentra disponible en Europa dado a que está reservada para HyperLAN2.

### 1.5.5 IEEE 802.11g

Este estándar que fue aprobado a mediados de 2003, se basa en 802.11b, opera sobre la misma frecuencia de 2.4 GHz, y es capaz de utilizar dos métodos de modulación: DSSS y OFDM. Con la implementación de DSSS se alcanza velocidades de 11 Mbps, mientras que con OFDM se consiguen velocidades superiores, pudiendo llegar hasta los 54 Mbps que ofrece 802.11a pero manteniendo las características de 802.11b en cuanto a distancia, niveles de consumo y frecuencia utilizada. En comparación con 802.11a, el 802.11g tiene un ancho de banda utilizable más bajo, lo que redundaría en un menor número de usuarios, pues aunque las modulaciones OFDM permiten una velocidad más alta, el ancho de banda disponible total en la banda de frecuencia de 2,4 GHz no varía. El motivo es que el IEEE 802.11g todavía está restringido a tres canales en la banda de 2,4 GHz.

Para que el método CSMA/CA funcione, cada estación debe ser capaz de detectar a todas las demás estaciones asociadas al mismo AP (incluido, obviamente, el propio AP). Pero con sistemas 802.11g que utilizan OFDM, las estaciones 802.11b heredadas son incapaces de detectar a los nuevos dispositivos, sin embargo, este problema se soluciona utilizando una función de Solicitud de Envío/Preparado para Enviar (*Request To Send/Clear To Send*, RTS/CTS)

Para que una red inalámbrica funcione correctamente, todos los nodos deben encontrarse dentro del radio de alcance del AP, aunque no suceda lo mismo entre ellos. Es lo que se conoce como problema del “nodo oculto”. En situaciones como ésta, se puede invocar el mecanismo de RTS/CTS para reducir la posibilidad de colisión. En IEEE 802.11g, la función RTS/CTS se puede utilizar para facilitar el funcionamiento de la red cuando hay una mezcla de clientes 802.11g y clientes 802.11b heredados operando en el mismo BSS que se explicará más adelante.

---

<sup>10</sup> La banda de 5 GHz (banda UNII, *Unlicensed National Information Infrastructure*) está formada por tres sub-bandas, UNII1 (5,15 - 5,25 GHz), UNII2 (5,25 - 5,35 GHz) y UNII3 (5,725 - 5,825 GHz). Cuando se utilizan tanto UNII1 como UNII2, hay 8 canales sin solapamiento disponibles; mientras que con la banda de 2,4 GHz sólo hay 3.

<sup>11</sup> Si bien es cierto que existen AP que ofrecen soporte para ambos estándares.

Todos los clientes y APs 802.11g deben ser capaces de operar exactamente como un dispositivo 802.11b heredado. De esta forma, la migración a la tecnología 802.11g es fácil y dinámica. Mientras se van adquiriendo e instalando nuevos APs 802.11g, los APs 802.11b heredados pueden permanecer en servicio y ser totalmente compatibles con los clientes 802.11g más nuevos.

Se observa entonces que al reunir conceptos de tecnologías como VoIP, Telefonía Celular y WLAN, es posible pensar en la creación de redes inalámbricas multicelda capaces de soportar transporte de voz y datos simultáneos, teniendo en cuenta las características de estos tipos de tráfico. Al utilizar en conjunto las ventajas que ofrecen los *códex*, en sus tareas de aumentar la calidad de la señal de voz sin que con ello se perjudique el retardo extremo a extremo; la planeación celular, que permite aumentar la capacidad del sistema gracias a la división de celdas lo que a su vez hace posible concentrar un mayor número de canales en aquellas zonas de mayor demanda; y demás aspectos evaluados a lo largo de este capítulo, enfocados a entornos propicios para el montaje de WLANs, pueden obtenerse buenos resultados en la implantación de este tipo de redes.

Sin embargo, sigue sin resolverse los problemas de QoS que enfrentan los flujos de tráfico en tiempo real que son soportados por redes IP, por lo que en el siguiente capítulo se abarcará un estudio sobre dicho interés, indicando las técnicas utilizadas para cumplir con requerimientos de QoS.



## 2. DIMENSIONAMIENTO DE VoIP SOBRE WLAN CON SOPORTE PARA 802.11e

Actualmente, el tráfico en las redes es muy diverso y cada tipo de tráfico tiene requerimientos especiales en términos de ancho de banda, retardo (*delay*), pérdida de paquetes y disponibilidad. El hecho de contar con un protocolo de transporte extremo a extremo (IP) resulta de ayuda debido a que el mantenimiento de los equipos de red es más fácil lo cual se refleja en costos de operación. Sin embargo, éste beneficio se ve perjudicado por el hecho de que IP es un protocolo no orientado a conexión lo cual conlleva a una calidad de servicio inesperada en una red *best-effort*<sup>12</sup> que transporta cualquier tipo de paquete desde el origen hasta el destino sin garantizar una entrega segura. No obstante, las redes IP actuales deben estar en la capacidad de soportar diferentes tipos de aplicaciones que presenten poca tolerancia hacia retardos, pues de lo contrario se generaría una degradación de la calidad percibida por el usuario final, o en el peor de los casos ocurrirá que dicha aplicación no funcione. Si se toma como ejemplo las transmisiones de voz que se llevan a cabo en las RTPC haciendo uso de la tecnología de Multiplexación por División de Tiempo (*Time Division Multiplexing*, TDM), éstas tienen un comportamiento determinístico en donde el tráfico de voz experimenta un pequeño retardo, el cual es fijo y que esencialmente se refleja en pérdidas de poca consideración. Para el caso de las redes de datos, las aplicaciones de voz requieren de tales condiciones para operar adecuadamente, es decir un nivel de calidad de “voz TDM”. Dado que el comportamiento de este tipo de redes es impredecible no podría obtenerse, en principio, la misma calidad ofrecida por una RTCP a causa de los retardos considerables y pérdida de paquetes que se presentan y que de hecho caracterizan a las redes IP. No obstante, existen mecanismos de QoS que pueden aplicarse sobre ellas para cumplir con los requerimientos exigidos que permiten a su vez ofrecer condiciones aceptables dentro de unos márgenes consistentes, predecibles y satisfactorios.

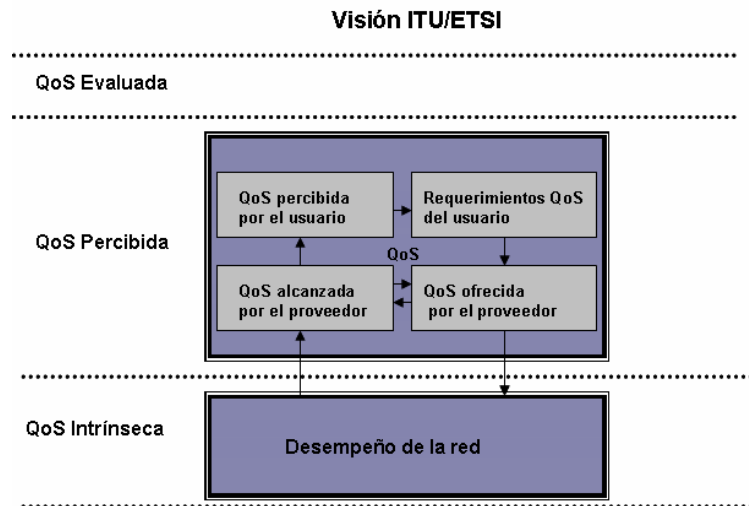
### 2.1 DEFINICIÓN DE CALIDAD DE SERVICIO

El propósito fundamental en el diseño de una red consiste en manejar de la mejor manera la demanda de tráfico, asegurando parámetros de calidad de servicio predefinidos, a la vez que se utiliza el menor número de recursos de red disponibles. Ejemplo de esto es la actual tendencia de las redes de telecomunicaciones la cual apunta a proporcionar diferentes tipos de servicios los cuales están definidos por unos requisitos determinados de QoS y que en conjunto hacen parte de una red convergente. Hasta el momento no se ha mencionado una definición lo suficientemente clara que haga referencia al concepto de QoS dado que éste depende de la perspectiva desde la cual sea analizado. De manera general e intuitiva, la calidad de servicio puede ser definida como el efecto del desempeño de un servicio (como conjunto de elementos) que determina el grado de satisfacción del usuario de dicho servicio. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la forma en como sea evaluado un servicio puede generar discrepancias entre operador y cliente debido a la ausencia de un Acuerdo a Nivel de Servicio (*Service Level Agreement*, SLA) que estipule notoriamente el desempeño de éste.

---

<sup>12</sup> Mejor Esfuerzo (*Best Effort*, BE). El tratamiento que las redes de paquetes ofrecen por defecto a todo el tráfico. Todos los paquetes reciben la misma atención y se transportan con el mejor esfuerzo de la red, sin que se establezcan prioridades para los servicios.

Con el propósito de enmarcar el Diseño de la Red WLAN Multicelda *Outdoor* se explicará brevemente las nociones de calidad de servicio que constituyen el modelo general de Calidad de Servicio (Ver Figura 10 [15]).



**Figura 10. Modelo general de calidad de servicio.**

- **Calidad de servicio intrínseca:** Esta QoS es responsabilidad del operador de red y está relacionada con parámetros técnicos involucrados con aspectos de planeación, diseño de la red de transporte, selección de mecanismos que garanticen una QoS determinada, provisión de la red de acceso, arquitectura de la red y gestión de la misma. Se expresa mediante parámetros como: *throughput*, *jitter*, retardo (*delay*) y tasa de pérdida de paquetes los cuales describen el comportamiento de los paquetes cuando están atravesando la red. Es evaluada a través de la comparación de los valores esperados y medidos.
- **Calidad de servicio percibida:** Relacionada con la experiencia que tiene el usuario al utilizar un servicio en particular. Es influenciada por la comparación entre lo que el usuario espera obtener y lo que es brindado por el operador. Además, depende de las opiniones de otros usuarios, de la publicidad y del *marketing*. Los parámetros se clasifican en las categorías relacionadas con el soporte del servicio y la operabilidad del mismo. Esta última hace referencia a la capacidad del servicio de ser utilizado por un usuario.
- **Calidad de servicio evaluada:** Comienza cuando el usuario decide si continua haciendo uso del servicio o no. Depende en gran parte de la calidad de servicio percibida, la cual a su vez, se ve acompañada por factores como costos, atención del proveedor frente a quejas y reclamos, entre otros.

El nivel de garantía con que se brinde una calidad de servicio intrínseca, percibida o evaluada debe ser considerado por separado. La primera es responsabilidad del operador de red y depende exclusivamente de la arquitectura de red, planeación y gestión convirtiéndose en labor de ingenieros, diseñadores y operadores. El uso apropiado de las capacidades de la calidad de servicio intrínseca adaptadas a un servicio en particular junto con un análisis de mercado, son mecanismos necesarios para asegurar un alto nivel de calidad de servicio percibido. Finalmente la calidad de servicio evaluada depende de los representantes de servicio y de un soporte técnico confiable.

Considerando las anteriores definiciones, el enfoque de este trabajo de grado está orientado hacia el análisis de los parámetros relacionados con QoS intrínseca al transmitir tráfico de voz y datos, aplicando conceptos de tecnologías como VoIP y telefonía celular. Esto con el fin de generar un conjunto de criterios que contribuyan a un mejor desempeño desde el punto de vista técnico, el cual se verá reflejado en una estimación adecuada de la capacidad del sistema. Sin embargo, como primera instancia es necesario conocer el funcionamiento a nivel MAC de la tecnología 802.11 y en particular del estándar 802.11e, temática que será tratada a continuación. Cabe anotar que sólo se tratará el nivel MAC dado que la modificación realizada por 802.11e está orientada hacia este nivel.

## 2.2 ESTÁNDARES IEEE 802.11 y 802.11e

Antes de proceder con la explicación a nivel MAC del estándar 802.11e es necesario conocer las características de su predecesor, su arquitectura, métodos de acceso, funcionamiento y limitaciones con el propósito de comprender de una mejor manera los cambios realizados al estándar 802.11, y entender aspectos adicionales a éstos que contribuyen con la prestación de servicios con requerimientos de calidad de servicio en entornos *outdoor*.

### 2.2.1 Estándar IEEE 802.11 Nivel MAC

El estándar IEEE 802.11 en su arquitectura básica a nivel MAC, define dos métodos de acceso al medio, como se puede apreciar en la Figura 11 [16], los cuales son: Función de Coordinación Distribuida (*Distributed Coordination Function*, DCF) y Función de Coordinación Puntual (*Point Coordination Function*, PCF). El primero provee un servicio *best-effort* o del mejor esfuerzo cuya implementación es obligatoria, mientras que PCF es opcional y provee servicios que exigen límites de tiempo.



Figura 11. Arquitectura MAC estándar 802.11.

Para estos métodos de acceso existen cuatro periodos de tiempo que se utilizan para controlar el tiempo de espera antes de acceder al medio. Éstos son:

- Espacio Inter-Trama Corto (*Short Interframe Space*, SIFS): Tiempo de espera más corto y por lo tanto la prioridad más alta para acceder al medio. Es utilizado en mensajes de control de pequeña longitud como tramas CTS, ACK y respuestas a mensajes de *polling*.
- Espacio Inter-Trama PCF (*PCF Interframe Space*, PIFS): Tiempo de espera más largo que SIFS pero más pequeño que el DIFS. Sólo es utilizado por las estaciones que operan bajo PCF.

- Espacio Inter-Trama DCF (*DCF Interframe Space*, DIFS): Tiempo de espera más largo que PIFS y con una menor prioridad de acceso al medio. Utilizado por estaciones que operan bajo DCF y transmiten tramas de datos o de gestión.
- Espacio Inter-Trama Extendido (*Extended Interframe Space*, EIFS): Tiempo de espera con mayor duración utilizado por las estaciones que operan bajo DCF y es empleado cuando ocurre una falla.

### 2.2.1.1 Las funciones de coordinación de 802.11: DCF y PCF

DCF opera sobre el Período de Contienda y se basa en el método CSMA/CA, cuyo funcionamiento, de forma general, se resume de la siguiente manera: una estación está en la capacidad de transmitir si ésta ha detectado que el medio está libre por al menos la duración de un DIFS. De lo contrario, la estación retrasa la transferencia de datos hasta que la transmisión que se encuentra en curso finalice. La duración de la transmisión del paquete que llega al nivel MAC es transmitida por el AP en el encabezado de la trama MAC sobre el Campo Duración (*Duration Field*) con el fin de actualizar el contador de cada estación llamado Vector de Asignación de Red (*Network Allocation Vector*, NAV) con tal duración expresada en microsegundos.

Una vez el NAV ha llegado a cero, la estación asume que la transmisión en curso ha finalizado y genera un tiempo de *backoff*<sup>13</sup> de la siguiente manera:

$$\text{Tiempo de backoff} = T_{B.O.} = \text{Random}(\ ) \times \text{SlotTime} \quad (1)$$

En donde *Random*( ) es un entero obtenido a partir de una función distribuida uniformemente<sup>14</sup> sobre el intervalo [0, CW] y CW hace referencia a la Ventana de Contienda (*Contention Window*, CW) la cual es un entero ubicado entre *CW<sub>min</sub>* y *CW<sub>max</sub>* (ver Tabla 4 [12], [13] y [14]). El término *SlotTime* está relacionado con la duración de la ranura de tiempo y de la misma manera que el SIFS su valor se obtiene a partir de la sumatoria de los retardos causados por el procesamiento a nivel MAC, la detección de la portadora, tiempo de transmisión del preámbulo (PLCP) y tiempo de propagación de la onda, características propias de la tecnología de nivel físico.

**Tabla 4. Parámetros MAC para 802.11a, b, g.**

Estándar	SIFS(μs)	SlotTime(μs)	PIFS(μs)	DIFS(μs)	CW <sub>min</sub>	CW <sub>max</sub>
802.11a	16	9	25	34	15	1023
802.11b	10	20	30	50	31	1023
802.11g <sup>15</sup>	10	9	19	28	15	1023
		20	30	50	31	1023

Una estación que hace uso del procedimiento de *backoff* utiliza el mecanismo de detección de portadora (nivel PHY) para determinar si el medio está libre en cada ranura de tiempo. El procedimiento de *backoff* decrementa su temporizador en una ranura de tiempo cada vez que detecta que el medio está libre por un período igual a la duración de una ranura de tiempo; si la estación determina que el medio está ocupado, el

<sup>13</sup> Período de tiempo aleatorio generado por la estación después de verificar que el medio está libre.

<sup>14</sup> Mediante esta función el estándar 802.11 procura brindar la misma probabilidad de transmisión a todas las estaciones que están compitiendo por el medio.

<sup>15</sup> Para este estándar la duración del *slot time* depende si se trabaja en una red completamente 802.11g (9 μs) o si existe interoperabilidad con equipos 802.11b (20 μs)

procedimiento de *backoff* se suspende, es decir, no decreta esa ranura de tiempo. Para proceder, el medio debe estar libre un DIFS y la estación comienza la transmisión una vez el temporizador de *backoff* haya expirado (llega al valor cero).

Una colisión se origina si dos o más estaciones transmiten al mismo tiempo, en este caso la ventana de contienda se duplica y se da inicio a un nuevo procedimiento de *backoff*. Como se mencionó anteriormente, la ventana de contienda se encuentra dentro de unos límites en donde esta inicia con un valor mínimo ( $CW_{min}$ ) y se duplica hasta llegar a un valor máximo ( $CW_{max}$ ) el cual se mantiene hasta que éste sea reseteado ( $CW_{min}$ ) después de cada intento de transmisión exitoso. Este proceso continúa hasta que la transmisión termine con éxito o la trama sea descartada.

Con el fin de proveer servicios con altas exigencias en tiempo tales como voz, audio, y video, en la especificación 802.11 original se definió la Función de Coordinación Puntual. PCF requiere de un AP que controle el acceso al medio y sondee las estaciones (*polling*), por lo tanto sólo se puede utilizar en las configuraciones de red en modo infraestructura y opera en el Período Libre de Contienda. Éste método de acceso utiliza un Punto Coordinador (*Point Coordinator*, PC) el cual funciona en el AP y es empleado para determinar que estación tiene permiso para transmitir. De hecho, PCF es un mecanismo de acceso de *polling* en donde el PC tiene el papel de sondeo maestro (*polling master*) y mantiene una lista de las estaciones registradas a las cuales autoriza una por una para dar inicio a la transmisión de su información. Ninguna estación está en la capacidad de transmitir al menos que sea autorizada, y de la misma manera reciben información de un AP solamente cuando reciben autorización del punto coordinador.

### 2.2.1.2 Limitaciones de calidad de servicio en DCF y PCF

Como ya es conocido, las aplicaciones de datos, video y audio tienen requerimientos de transmisión diferentes. Sin embargo, con DCF todas las estaciones y flujos de datos tienen la misma prioridad de acceso al medio, es decir no hay manera de favorecer el cumplimiento de los parámetros de calidad para cada servicio debido a la ausencia de un mecanismo que brinde prioridad en el acceso al medio según el tipo de paquete. En otras palabras, una estación no tiene la capacidad de diferenciar sus propios paquetes y por lo tanto carece de la capacidad de manejar QoS diferentes.

Aunque PCF se diseñó con el fin de proveer servicios con exigencias de tiempo, este método de acceso tiene ciertos problemas [17] que llevan a un desempeño con una calidad de servicio pobre. Entre estos se encuentran:

- La incapacidad de las estaciones de comunicar sus requerimientos de QoS al Punto Coordinador hace difícil optimizar el mecanismo de sondeo en el PC.
- La provisión de QoS hace referencia a la transmisión de paquetes durante el Período Libre de Contienda (*Contention Free Period*, CFP), es decir PCF es un procedimiento estático de provisión de QoS.
- Los retrasos impredecibles en la trama *Beacon*<sup>16</sup> conducen a un CFP más corto.
- PCF puede garantizar la transmisión de un paquete en cada período de supertrama (CFP+CP<sup>17</sup>). Sin embargo, si un servicio necesita de una transmisión de paquetes con mayor frecuencia, la red no está en la capacidad de soportarlo.

---

<sup>16</sup> Trama de gestión que contiene información relacionada con el SSID (*Service Set ID*), parámetros de configuración de Salto en Frecuencia (*Frequency Hopping*, FH), Secuencia Directa (*Direct Sequence*, DS), entre otros.

Teniendo en cuenta las anteriores limitaciones, el Grupo de Trabajo E se encargó de mejorar el nivel MAC de 802.11 con el fin de soportar aplicaciones que tienen diferentes requerimientos de QoS. Como resultado de esto, se aprobó en el mes de Julio de 2005 el estándar 802.11e cuya operación a nivel MAC se explicará a continuación.

## 2.2.2 Estándar IEEE 802.11e

Dado que el principal objetivo de éste estándar está orientado hacia la provisión de calidad de servicio en aplicaciones con altas exigencias, a continuación se explicarán un conjunto de conceptos que sirven de base para la comprensión de las funciones de coordinación propias del mismo.

De la misma manera que en el estándar 802.11, el BSS es el bloque constitutivo del estándar 802.11e con la diferencia de que éste soporta calidad de servicio y se denota como Conjunto de Servicio Básico con Calidad de Servicio (*Quality of Service Basic Service Set*, QBSS). Además, las estaciones clientes que también soportan QoS se conocen como Estaciones con Calidad de Servicio (*Quality of Service Stations*, QSTA).

### 2.2.2.1 Provisión de QoS

El estándar 802.11e define dos tipos de soporte de QoS para el tráfico de un QBSS:

- **Calidad de servicio con prioridad:** Su principal tarea es la identificar la prioridad de una trama de datos con relación a otra. Se definen ocho Categorías de Tráfico (*Traffic Categories*, TC) las cuales son un conjunto de tramas de datos que se diferencian del resto mediante un Identificador de Categoría de Tráfico (*Traffic Category Identification*, TCID) de acuerdo a un mapeo predefinido de prioridades. Este valor varía desde 0 hasta 7.
- **Calidad de servicio parametrizada:** En esta calidad de servicio, las tramas de datos con características de tráfico similares son agrupadas en clases de tráfico llamadas Flujos de Tráfico (*Traffic Streams*, TS). La provisión de la calidad de servicio se realiza mediante la definición de las características de tráfico que se otorgan a dichas TS, y que son utilizadas en un QBSS (tales como: tamaño nominal Unidad de Datos de Servicio (*MAC Service Data Unit*, MSDU), tasa media de datos, límite de retardos, etc.). Un flujo de tráfico es una trama de datos unidireccional que es reconocido por un Identificador de Flujo de Tráfico (*Traffic Stream Identifier*, TSID) el cual es utilizado por entidades de nivel superior con el propósito de indicar al nivel MAC a que TS pertenece una trama de datos en particular y sus correspondientes requerimientos de QoS. Este valor se encuentra en el rango de 8 a 15.

## 2.2.3 Flujos de Tráfico

### 2.2.3.1 Generación de un flujo de tráfico

Es determinada por capas de nivel superior tras la petición de una aplicación, la cual se entrega, posteriormente, a la Entidad de Gestión de Estaciones (*Station Management Entity*, SME) de la QSTA la cual hace parte del plano de gestión del estándar de 802.11. A continuación, la SME le permite al nivel MAC generar un nuevo flujo de tráfico con

---

<sup>17</sup> Período de Contienda (*Contention Period*, CP).

características específicas cuya definición se conoce como Especificación de Tráfico (*Traffic Specification*, TSEPC) y que son brindadas por la SME [18].

### 2.2.3.2 Especificación de tráfico de un TS

Como se mencionó anteriormente, una especificación de tráfico es la definición de las características de un flujo de tráfico (por ejemplo, los parámetros que definen el tipo de tráfico y que serán generados e intercambiados a través de un TS). Estos parámetros pueden ser de dos tipos: el primero describe las características generales del TS tales como direcciones de fuente y destino, dirección del flujo, tipos de ACKs requeridos por las MSDUs (una nueva funcionalidad que tiene las alternativas: NO ACK, Normal ACK, Block ACK y Delay ACK) y el tipo de TS que describe su patrón de tráfico (periódico o no); el segundo grupo de parámetros está relacionado con las características de las tramas para un TS en particular y sus requerimientos para su transmisión.

### 2.2.4 Modificación de las Funciones de Acceso

El estándar 802.11e establece en su arquitectura (Ver Figura 12 [19]) una nueva función de acceso llamada Función de Coordinación Híbrida (*Hybrid Coordination Function*, HCF) la cual define dos funciones que se diferencian según el método de acceso que utilicen. En el método de Acceso al Canal Distribuido Mejorado (*Enhanced Distributed Channel Access*, EDCA) una de las funciones de 802.11e consiste en una modificación de la función DCF existente soportando calidad de servicio con prioridad, y en obtener acceso al canal basándose en la contienda del medio. Por otra parte, la segunda función llamada Acceso al Canal Controlado HCF (*HCF Hybrid Controlled Channel Access*, HCCA) controla el acceso al canal con el fin de proveer una calidad de servicio parametrizada. El término híbrido hace referencia a la capacidad de operar tanto en el Período de Contienda como en el de Libre de Contienda.

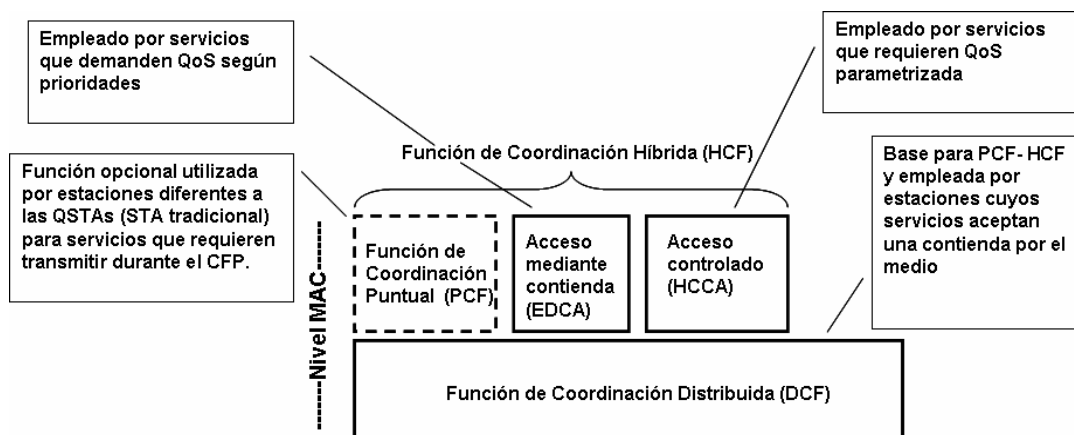


Figura 12. Arquitectura MAC estándar 802.11e.

#### 2.2.4.1 Acceso al Canal Distribuido Mejorado (EDCA)

Esta función es una mejora de las funcionalidades básicas de DCF soportando adicionalmente las categorías de tráfico de QoS con prioridad descritas previamente e intenta determinar una transmisión justa para cada trama. Para el soporte de EDCA,

802.11e define cuatro Categorías de Acceso (*Access Categories, AC*) y cada TC se mapea en una de estas AC según se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5. Mapeo de las Categorías de Tráfico sobre las Categorías de Acceso.**

Nivel de prioridad	Categoría de Tráfico (TC)	Categoría de Acceso (AC)	Tipo de Tráfico
Más baja ↓ Más alta	1	AC_BK	Background
	2	AC_BK	Background
	0	AC_BE	Best Effort
	3	AC_BE	Best Effort
	4	AC_VI	Video
	5	AC_VI	Video
	6	AC_VO	Voz
	7	AC_VO	Voz

Una QSTA opera de acuerdo a las mismas reglas generales definidas para DCF pero con la diferencia de que provee una cola (separada) para cada categoría de acceso. El tiempo de escucha de cada cola, previo a la transmisión, es diferente y recibe el nombre de Espacio Inter-Trama Arbitrario (*Arbitration Interframe Space, AIFS*). Por ejemplo, si la categoría de acceso  $i$  tiene una prioridad menor que la categoría de acceso  $j$  ( $AC_i < AC_j$ ) entonces el AIFS de la primera es mayor que el de la segunda ( $AIFS_i > AIFS_j$ ). Es decir que las MPDUs de la categoría  $i$  deben esperar a que el medio esté libre por más tiempo que las de la categoría  $j$ . De esta manera EDCA provee prioridad de acceso al medio a las MPDUs con una prioridad más alta. El Espacio Inter-Trama Arbitrario de cada categoría de acceso se calcula mediante la expresión (2) en la cual el término AIFSN corresponde al Número Arbitrario de Espacio Inter-Trama (*Arbitration Interframe Space Number, AIFSN*) y cuyo valor es un número entero que depende de la categoría de acceso. La Tabla 6 contiene este valor para los diferentes estándares IEEE 802.11.

$$AIFS[AC] = AIFSN[AC] \times SlotTime + SIFS \quad (2)$$

Cada cola tiene sus propios valores de ventana de contienda máxima y mínima ( $CW_{min}$   $CW_{max}$ ), contadores de tiempo de *backoff* y la transmisión de paquetes se realiza de manera independiente una vez que su contador de *backoff* haya llegado a cero. Es así como el tráfico con la más alta prioridad tendrá, de una manera estadística, tiempos de *backoff* más cortos que el tráfico con una prioridad más baja. Dada la situación en que los contadores de *backoff* de dos colas en la misma QSTA llegan al valor de cero al mismo tiempo, la cola con la menor prioridad retrasa su transmisión y cede el derecho a transmitir a la cola con prioridad más alta. En este caso, la cola con menor prioridad asume este hecho como la presencia de una colisión en el medio de transmisión (asume que el medio está ocupado) y en el estándar 802.11e a esto se le conoce como Resolución de Colisión Interna.

Si una estación gana el acceso al medio durante el período de contienda, ésta puede transmitir una o más tramas (de la misma cola) durante una Oportunidad de Transmisión (*Transmission Opportunity, TXOP*, ya sea al mismo destino o a un destino diferente hasta que la TXOP alcance su valor límite (TXOPLimit). Las transmisiones que tienen lugar dentro de la TXOP se separan por un SIFS y se conocen como Ráfagas Libres de Contienda (*Contention Free Burst, CFB*).

El resto de estaciones fijan su NAV de la misma manera que en DCF y así posponen la transmisión de su información. La información acerca de TXOP Limit,  $CW_{min_i}$ ,  $CW_{max_i}$ ,



AIFS<sub>i</sub>, se difunde a través de un nuevo campo en la trama *Beacon* llamado *QoS Parameter Set Element*. Los valores de los parámetros de contienda según la categoría de acceso se encuentran en las Tablas 6 y 7 [19].

Al comparar las Tablas 4 y 6 se deduce que la probabilidad de acceso al medio de una STA 802.11b y una QSTA con tráfico en la categoría de acceso de voz (AC\_VO, 802.11b), es similar debido a que los tiempos de contienda son los mismos (50  $\mu$ s). Esto conduce a una disminución del desempeño del estándar 802.11e cuando éste opera con estaciones que trabajan bajo el esquema MAC basado en DCF ya que el acceso al medio por parte de una categoría de acceso de voz debe competir en igualdad de condiciones que las de una STA que desee transmitir tráfico de datos (*web browsing*, *e-mail*, Protocolo de Transferencia de Archivos (*File Transfer Protocol*, FTP)), dejando a un lado la prioridad del tráfico de voz sobre la transmisión del resto de estaciones.

**Tabla 6. Valores por defecto de AIFSN y AIFS para los estándares IEEE 802.11a/b/g**

	AIFS [VO] ( $\mu$ s)	AIFS [VI] ( $\mu$ s)	AIFS [BE] ( $\mu$ s)	AIFS [BK] ( $\mu$ s)
<b>AIFSN</b>	2	2	3	7
<b>802.11a</b>	34	34	43	79
<b>802.11b/g</b>	50	50	70	150
<b>802.11g</b> <sup>18</sup>	28	28	37	73

**Tabla 7. Valores por defecto de los parámetros que determinan la calidad de servicio de una aplicación en particular**

Categorías de Acceso	AC_VO	AC_VI	AC_BE	AC_BK
<b>802.11a/g</b>				
<b>TXOP (<math>\mu</math>s)</b>	1504	3008	0	0
<b>CW<sub>min</sub></b>	3	7	15	15
<b>CW<sub>max</sub></b>	7	15	1023	1023
<b>802.11b</b>				
<b>TXOP (<math>\mu</math>s)</b>	3264	6016	0	0
<b>CW<sub>min</sub></b>	7	15	31	31
<b>CW<sub>max</sub></b>	15	31	1023	1023

#### 2.2.4.2 Acceso controlado al canal HCF (HCCA)

Como se mencionó anteriormente, 802.11e propone una nueva función llamada HCCA la cual se utiliza para proveer calidad de servicio a las estaciones de un QBSS en modo infraestructura y su principal función es la de proveer oportunidades de transmisión (TXOP) a las QSTA de acuerdo a sus necesidades de tráfico. HCCA hace uso de un punto coordinador llamado Coordinador Híbrido (*Hybrid Coordinator*, HC) el cual se coloca por defecto en el AP del QBSS. A diferencia de PCF en el estándar IEEE 802.11, HCCA opera durante los períodos CFP y CP. Durante el CFP, las estaciones no pueden competir por el medio ya que su NAV no está activo y por lo tanto el HC tiene la ventaja de acceder al medio libremente. Durante el CP, el HC también puede tener acceso al medio cuando detecte que está libre, esto lo hace utilizando la prioridad EDCA más alta (AIFS= PIFS, CW<sub>min</sub> = CW<sub>max</sub> = 0) ya que el mínimo tiempo de escucha para acceder al medio del resto de estaciones es el DIFS, el cual es mayor que el PIFS.

<sup>18</sup> Sólo para redes completamente 802.11g

El Coordinador Híbrido asigna oportunidades de transmisión a las estaciones, mediante un mecanismo de sondeo mejorado, las cuales pueden ser asignadas a intervalos que se adaptan a la tasa de transferencia y requerimientos de retardo de flujos de tráfico en particular. Para esto el HC de cada QBSS necesita tener un amplio conocimiento de la cantidad de tráfico acumulado perteneciente a las diferentes categorías de tráfico (con diferentes prioridades) y así poder asignar una TXOP adecuada. Esto aumenta la complejidad.

El mecanismo mediante el cual el HC conoce los requerimientos de las QSTAs es el siguiente: El HC es informado sobre la cantidad de tráfico acumulado relacionado con una categoría específica mediante un proceso llamado *piggybacking*<sup>19</sup>, el cual consiste en enviar tal información en la misma trama de datos que las QSTAs envían al HC. Cada trama de datos contiene un nuevo campo tal como se muestra en la Figura 13, en el cual la trama indica su Categoría de Tráfico (0-7) o Flujo de Tráfico y el tamaño de la cola (en número de bytes) en la QSTA para esta categoría o flujo. Una QSTA que necesita solicitar una TXOP puede transmitir una trama de datos nula o vacía, con el fin de expresar su necesidad. Además, HCCA protege cada TXOP mediante el uso del mecanismo de Detección Virtual de Portadora al fijar el NAV en las otras estaciones con el valor de la duración de la TXOP en lugar de silenciar a todas las estaciones en el QBSS durante el CFP. De esta manera HCCA genera unas Fases de Acceso Controlado (*Controlled Access Phases, CAP*) durante las cuales el HC tiene el control del medio y brinda al resto de estaciones la posibilidad de transmitir paquetes utilizando las TXOPs.

Octetos: 2	2	6	6	6	2	6 ó 0	2	0-2312	4
Control de Trama	Duración-ID	Dirección 1	Dirección 2	Dirección 3	Control de Secuencia	Dirección 4	Control de QoS	Carga útil	FCS

**Figura 13. Encabezado MAC QoS de una trama de datos**

En particular los bits del campo de Control de QoS permiten identificar si la trama pertenece a una categoría de tráfico (TC) o a un flujo de tráfico (TS), el tipo de reconocimiento que se está utilizando (ACK, No ACK, Block ACK), la duración del TXOP (TXOPlimit) asignado por el HC, la duración del TXOP requerido por una estación que desea transmitir, la cantidad de tráfico en el *buffer* de la estación generadora de tráfico, entre otras configuraciones.

Cabe anotar que al ser aprobado el estándar 802.11e a mediados del año 2005 la Alianza Wi-Fi ratificó una especificación interna denominada Wi-Fi Multimedia (*Wi-Fi Multimedia, WMM*) con el propósito de facilitar la interoperabilidad y garantizar la QoS entre diferentes proveedores de equipos según el tipo de tráfico que exista en la red. Para la clasificación de los paquetes, WMM se basa en cuatro categorías: voz, video, *best effort*, y *background*, es decir, WMM se basa en EDCA. De igual manera el grupo de estudio E tomó en consideración a HCCA como mecanismo de acceso generando un nuevo grupo conocido como Acceso Programado Wi-Fi Multimedia (*Wi-Fi Multimedia Scheduling Access, WMM-SA*). Sin embargo, en mayo de 2006, la junta directiva de la Alianza Wi-Fi decidió dar por terminado el grupo WMM-SA dejando así a WMM (EDCA) como único esquema de QoS que puede ser certificado en equipos de la Alianza Wi-Fi [20].

Además de los mecanismos EDCA y HCCA descritos anteriormente, el estándar 802.11e provee mejoras adicionales a nivel MAC [17] entre las que se encuentran:

<sup>19</sup> Se acostumbra a dejar en inglés.

- **Ráfagas Libre de Contienda:** Las ráfagas de libre contienda se pueden definir como un período de tiempo en el cual las QSTA y los puntos de acceso con QoS pueden transmitir un número determinado de tramas una tras otra (separadas por un SIFS) sin la necesidad de competir por el medio cada vez que quiere transmitir una trama. Como se mencionó anteriormente, el número de tramas que se pueden transmitir depende de la Oportunidad de Transmisión ya sea en EDCA o HCCA. En la Figura 14 se observa la transmisión de datos con y sin CFB.

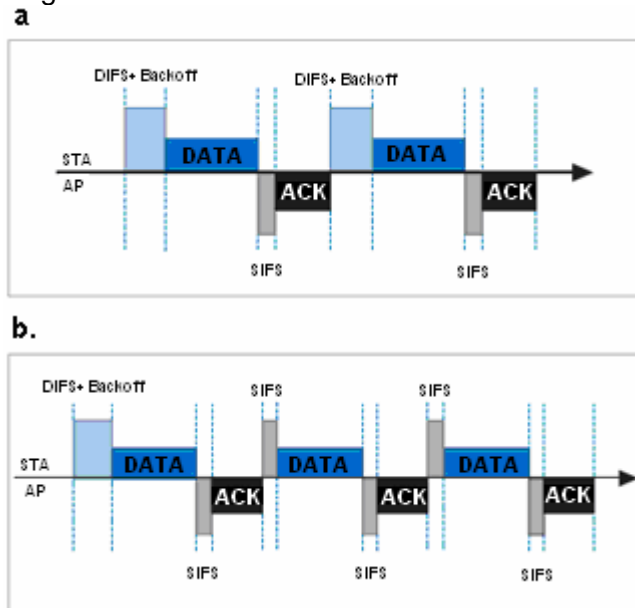


Figura 14. a) Transmisión de datos sin hacer uso de CFB. En este caso una vez la estación haya recibido un ACK del paquete inmediatamente anterior vuelve a competir por acceder al medio esperando un DIFS más un tiempo de *backoff*. b) Mediante el uso de CFB un cliente puede transmitir múltiples tramas sin la necesidad de generar un DIFS más un tiempo de *backoff* después de recibir un ACK.

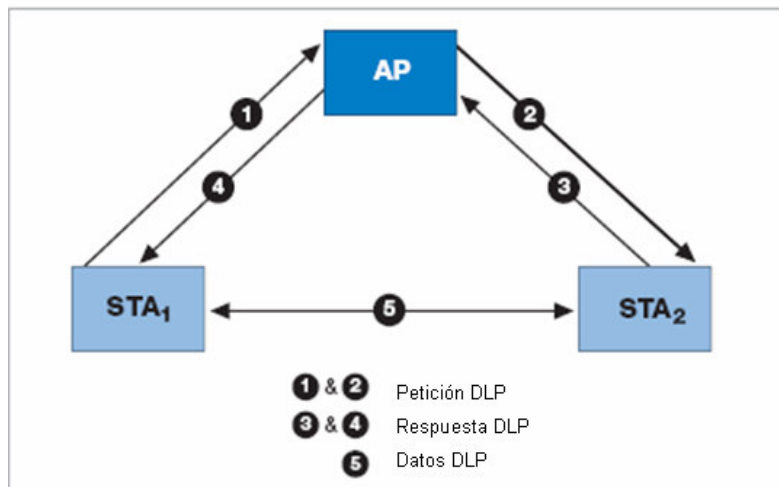
El envío de ráfagas puede mejorar significativamente el desempeño de la red ya que se eliminan los tiempos asociados con un DIFS o con un tiempo de *backoff* aumentando el *throughput* en redes mixtas compuestas por 802.11b y 802.11g. No obstante, la selección de un valor TXOPLimit apropiado se debe considerar en flujos con baja tolerancia a los retardos. En cualquier instante, cuando se adquiere una TXOP el máximo número de tramas que pueden ser enviadas depende del número de tramas que se encuentren en el *buffer* MAC así como de la tasa de transmisión a nivel físico. Por lo tanto, el TXOPLimit debe ser directamente proporcional al tamaño del *buffer* e inversamente proporcional a la tasa de transmisión a nivel físico [21].

- **Nuevas reglas de Reconocimiento (ACK):** Al igual que en el estándar 802.11, en 802.11e todas las tramas *unicast* requieren de una trama de control ACK inmediata pero existen dos nuevas opciones que se especifican en campo de Control de QoS en las tramas de datos. Estas son:

*No ACK:* Incrementa la eficiencia al no enviar ACKs en ciertas aplicaciones. Esta funcionalidad es especialmente útil para aplicaciones con una baja tolerancia a la latencia pero puede aceptar cierta pérdida de paquetes.

**ACK de Bloque (Block ACK):** Mejora la eficiencia al agregar un ACK por múltiples tramas (bloque) a través de una sola respuesta. Este puede ser de dos tipos: inmediato y con retardo. En el primer caso el receptor debe responder inmediatamente con una Trama ACK de Bloque una vez este haya recibido una petición por parte del transmisor. Esta petición se realiza cuando el transmisor termina de enviar múltiples tramas en el CFB durante el TXOP. Para el segundo tipo, la estación receptora responde a la petición del transmisor informándole que la transmisión del ACK de Bloque se retardará un poco. Esto con el fin de realizar un mejor cálculo del ACK en sistemas de bajo desempeño.

- Protocolo de Enlace Directo:** La especificación general del estándar 802.11 permite que en una red en modo infraestructura el flujo de datos se realice solamente entre las estaciones y el AP. El Protocolo de Enlace Directo (*Direct Link Protocol, DLP*) en el estándar 802.11e permite el intercambio de información entre estaciones de manera directa sin la necesidad de atravesar el punto de acceso tal como se muestra en la Figura 15. Esta funcionalidad puede incrementar aproximadamente hasta dos veces el ancho de banda disponible en una comunicación cliente-cliente siempre y cuando ambas se encuentren en el rango de transmisión de cada una de ellas. Además, puede existir una mejora en el desempeño del sistema dado el caso en que las estaciones se encuentren más próximas entre sí y que el estado del enlace sea mejor entre ellas en comparación al enlace con el punto de acceso.



**Figura 15. Aplicación del Protocolo de Enlace Directo**

- Piggybacking:** Como se mencionó anteriormente, al enviar datos y ACKs sobre la misma trama se reducen los sobre-encabezados (*overhead*) mejorando el desempeño general de la red.
- Entrega Automática con Ahorro de Energía:** La Entrega Automática con Ahorro de Energía (*Automatic Power-Save Delivery, APSD*) es una mejora al mecanismo de Ahorro de Energía (*Power Save*) del estándar 802.11 que contribuye con la prolongación de la vida de las baterías permitiendo la opción de apagar los dispositivos durante la mayoría del tiempo mediante la programación de un horario (*schedule*) basado en el patrón de repetición de la trama *Beacon*. Esta funcionalidad es apropiada para aplicaciones VoIP en donde los paquetes son

transmitidos en intervalos de tiempo periódicos, y para dispositivos como, por ejemplo, los teléfonos VoWi-Fi.

Una vez tratados los puntos más relevantes de la tecnología 802.11 y la modificación realizada por el estándar 802.11e se hace necesario realizar una estimación adecuada de la capacidad de un *hotspot* basada en las características descritas anteriormente. Este tema se tratará en las secciones siguientes.

## 2.3 CONSUMO DE ANCHO DE BANDA POR LLAMADA VoIP

A la hora de estimar la capacidad de un sistema es vital conocer el ancho de banda que una aplicación requiere. A continuación se explican las consideraciones a tener en cuenta y los respectivos cálculos de consumo de ancho de banda.

La estimación del ancho de banda de una llamada VoIP se puede resumir en dos parámetros: número de paquetes transmitidos por segundo y el tamaño de cada uno de éstos. Sin embargo, cada parámetro depende de una serie de consideraciones que afectan su valor.

Para el caso del número de Paquetes Por Segundo (PPS) su valor está estrechamente relacionado con el tipo de *códec*, ya que de éste depende el tamaño de cada muestra de voz y el tiempo de muestreo. La forma como se relacionan estos valores se puede observar en la expresión 3:

$$\text{PPS} = \frac{\text{CBR}}{\text{Tamaño de muestra de voz}} \quad (3)$$

$$\text{CBR} = \frac{\text{Tamaño de la muestra de voz}}{\text{Tiempo de muestreo}} \quad (4)$$

En la expresión 4 la Tasa de Generación de Bits del *Códec* (*Códec Bit Rate*, CBR) se hace referencia a la cantidad de bits que el *códec* genera en un tiempo determinado dependiendo de las características propias de cada uno de éstos. Para este caso, el tamaño de la muestra o carga útil de voz indica el número de bits que se van a emplear para codificar la información que ha sido muestreada durante un tiempo determinado y generalmente el resultado del cociente de éstas dos cantidades está expresado en bits por segundo (*bps*) y su valor es constante. Sin embargo, la carga útil también puede expresarse en términos de tiempo (milisegundos, segundos, etc.) como se verá más adelante.

Hasta este punto se conoce el número de bits por segundo que se obtiene a la salida del *códec* mas no se ha considerado la cantidad de paquetes que se transmitirán por unidad de tiempo. Esta cantidad depende del número de muestras de voz que se desea transmitir en cada trama<sup>20</sup> debido a que el principal objetivo es transportar una determinada cantidad de información de acuerdo con la CBR pero en paquetes cuyo tamaño es variable. Como consecuencia de esto, si cada paquete transporta mayor cantidad de información, menor va a ser el número de paquetes a transmitir en una determinada unidad de tiempo. En otras palabras, el cálculo del número de PPS es

<sup>20</sup> Trama conformada por los encabezados RTP, UDP, IP, MAC, PHY y la carga útil de voz.

equivalente a calcular cuántas tramas se van a transmitir por segundo con el fin de satisfacer el número de bits que el *códec* está generando en ésta unidad de tiempo y cuyo tamaño depende de la cantidad de muestras de voz que se deseen transmitir por cada trama junto con los encabezados de los diferentes niveles del modelo OSI.

Con el propósito de clarificar los anteriores parámetros se procederá a realizar un ejemplo de cálculo con un *códec* en particular.

**Ejemplo 1:**

Se tomará como ejemplo el *códec* G.729 cuyas características más relevantes son:

- Tamaño de la muestra: 10 bytes
- Tiempo de muestreo: 10 ms

Haciendo uso de la expresión 4 se tiene que:

$$CBR = \frac{10 \text{ bytes}}{10 \text{ ms}} = \frac{80 \text{ bits}}{10^{-3} \text{ s}} = 8000 \text{ bps} = 8 \text{ Kbps}$$

Ahora se considerarán tres tipos de tamaño de muestra:

- a) Una muestra de 10 ms o 10 bytes, mediante la expresión 3 se obtiene:

$$PPS = \frac{8 \text{ Kbps}}{10 \text{ bytes}} = \frac{8000 \text{ bps}}{80 \text{ bits}} = 100 \text{ paquetes de voz por segundo}$$

- b) Con dos muestras de 10 ms o 20 bytes

$$PPS = \frac{8 \text{ Kbps}}{20 \text{ bytes}} = \frac{8000 \text{ bps}}{160 \text{ bits}} = 50 \text{ paquetes de voz por segundo}$$

Es decir en un segundo se transmiten 50 paquetes cada uno con 20 bytes (2x10ms) de señal muestreada

- c) Tres muestras de 10 ms o 30 bytes

$$PPS = \frac{8 \text{ Kbps}}{30 \text{ bytes}} = \frac{8000 \text{ bps}}{240 \text{ bits}} = 33.33 \text{ paquetes de voz por segundo}$$

Por lo tanto se concluye una vez más que el número de paquetes por segundo es inversamente proporcional al tamaño de la muestra transmitida.

Una vez conocido el número de paquetes que se van a transmitir es necesario calcular el tamaño de la trama a nivel IP teniendo en cuenta los encabezados agregados por cada protocolo empleado en la transmisión de las muestras de voz, lo anterior con el fin de estimar el ancho de banda requerido por una llamada VoIP (unidireccional).

La obtención del valor del ancho de banda se resume en la siguiente expresión:

$$\text{Ancho de banda}_{\text{unidir}} = PPS \times \text{Tamaño de cada trama} \quad (5)$$

En donde cada trama a nivel IP se compone de un conjunto de encabezados más la carga útil como se muestra en la Figura 16.

Sin embargo, mediante procesos como el utilizado por el Protocolo de Tiempo Real Comprimido (*Compressed Real Time Protocol, CRTP*) se puede obtener una reducción en el tamaño total de los encabezados con la ventaja de disminuir en ancho de banda y de mucha utilidad en WANs.

Por lo tanto, teniendo en cuenta el tamaño total que suman los encabezados (excepto nivel 2) y el tamaño de cada muestra de voz se tiene que el tamaño de cada trama es:

$$\text{Tamaño trama IP} = 40 \text{ bytes de encabezado (20 bytes de IP, 8 bytes de UDP (6) y 12 bytes para RTP)} + \text{Tamaño de la muestra de voz}$$

Es decir en el primer caso del ejemplo 1 se obtiene:

$$\text{Tamaño de cada trama IP} = 40 \text{ bytes} + 10 \text{ bytes} = 50 \text{ bytes}$$

Y el ancho de banda se calcula mediante la expresión 3:

$$\text{BW} = 50 \text{ bytes} * 100 \text{ pps} = (50 * 8 \text{ bits}) * 100 \text{ pps} = 40000 \text{ bps} = 40 \text{ Kbps}$$

Y para el caso de la transmisión de un mayor número de muestras por paquete se tiene:

Para dos muestras:

$$\text{BW} = 60 \text{ bytes} * 50 \text{ pps} = 60 * 8 \text{ bits} * 50 \text{ pps} = 24 \text{ Kbps}$$

Y con tres muestras de 10 milisegundos se obtiene:

$$\text{BW} = 70 \text{ bytes} * 33.33 \text{ pps} = 70 * 8 \text{ bits} * 33.33 \text{ pps} = 18.6 \text{ Kbps}$$

Como era de esperar, el ancho de banda disminuye a medida que el número de paquetes transmitidos se reduce. Sin embargo, a medida que se transmitan menos paquetes, mayor cantidad de información será transmitida (mayor número de muestras) en cada uno de ellos conduciendo a un incremento en la cantidad de retardo en cada llamada puesto que los recursos del Procesador Digital de Señal (*Digital Signal Processor, DSP*) deben almacenar las muestras por un periodo de tiempo mayor.

Es así como la selección de un *códec* adecuado y la posibilidad de reducir el tamaño de cada encabezado, contribuyen a una disminución en el ancho de banda y de igual manera aporta a los criterios de diseño de una red con características relacionadas con entornos *outdoor* y con soporte para 802.11e tal como se verá más adelante.

Aunque conocer el ancho de banda de una llamada VoIP es de gran importancia, aún es necesario abordar el concepto de *throughput* que sirve de base para brindar una estimación aproximada de la capacidad de un sistema y será tratado a continuación.

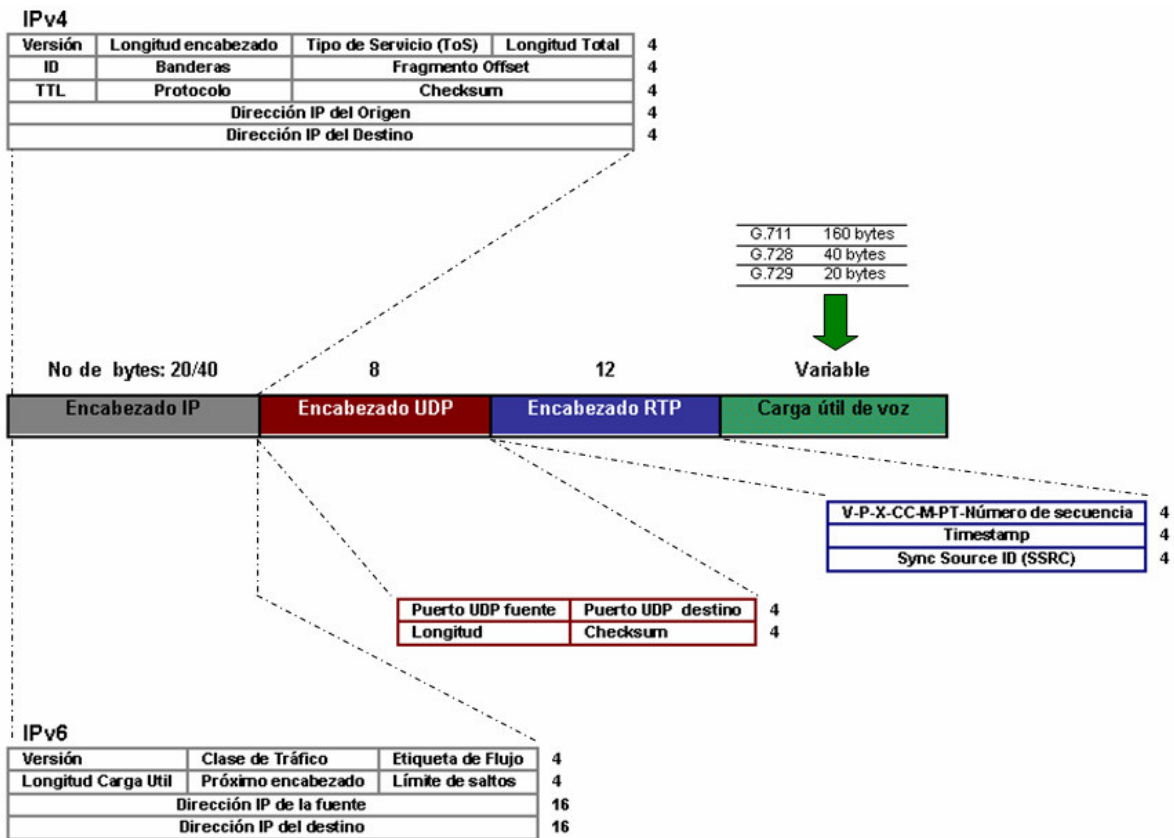


Figura 16. Encapsulamiento de VoIP IPv4 e IPv6

### 2.3.1 Cálculo del Número de Sesiones VoIP

De manera general, en la transmisión de datos, el ancho de banda requerido por una aplicación junto con el ancho de banda disponible, son parámetros necesarios para realizar una aproximación del número de usuarios que una red está en capacidad de soportar. WLAN no es la excepción y mediante el uso de estos parámetros además del cálculo del *throughput* se da origen a la posibilidad de establecer un número de sesiones VoIP máxima.

El *throughput* o Tasa Efectiva de Transferencia, como su nombre lo indica, se relaciona con la cantidad de información que se transmite de manera efectiva durante un período de tiempo (Expresión 7). El término “efectivo” hace referencia a la velocidad neta de transmisión de los datos considerando la disminución de la velocidad nominal debido a la transmisión de información de *overhead* que se agrega al comienzo y al final de una transmisión (información para el control de errores, enrutamiento, bits de redundancia, entre otros). El cálculo de este parámetro puede realizarse a cualquier nivel (Físico, Enlace, Red, Transporte, etc.) de tal manera que es conveniente realizar un acuerdo previo tanto en el transmisor como en el receptor con el fin de evitar obtener resultados incoherentes.

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Tamaño del paquete de datos}}{\text{Tiempo de transmisión}} \quad (7)$$



En la expresión anterior, el término de especial consideración es el Tiempo de Transmisión ( $T_{TX}$ ) puesto que está compuesto por la suma de diferentes tiempos cuya duración está estrechamente relacionada con parámetros propios del nivel MAC de 802.11e y que serán descritos a continuación.

De la sección 2.2.2.1 se puede deducir que para que la transmisión de un paquete a nivel MAC sea exitosa se deben presentar los siguientes eventos de manera secuencial:

1. Tiempo de espera igual a 1 AIFS ( $AIFS\_AC$ ) según la categoría de acceso.
2. Generación del tiempo de *backoff* ( $T_{B.o}$ ).
3. Transmisión del paquete de datos.
4. Tiempo de espera de un ACK igual a 1 SIFS.
5. Transmisión del paquete ACK ( $T_{ACK}$ ).

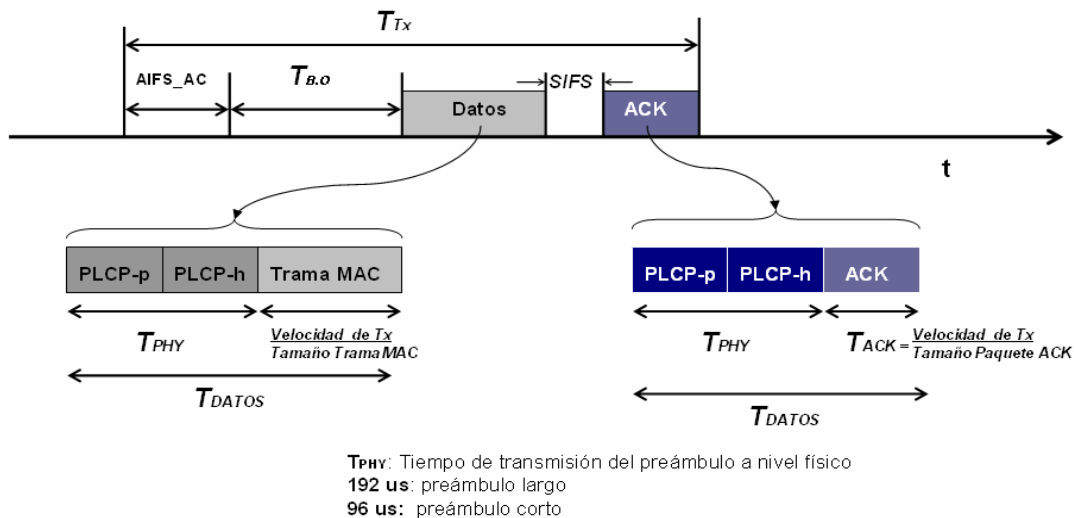
En donde el tiempo necesario para transmitir un paquete de datos (trama MAC o ACK) se encuentra mediante la expresión<sup>21</sup>:

$$T_{DATOS} = T_{PHY} + \frac{\text{Tamaño del paquete}}{\text{Velocidad de transferencia de datos}} \quad (8)$$

De tal manera que el tiempo de transmisión se puede expresar de la siguiente forma:

$$T_{TX} = AIFS\_AC + T_{B.o} + T_{DATOS} + SIFS + T_{ACK} \quad (9)$$

En la Figura 17 puede apreciarse lo expuesto anteriormente.



**Figura 17. Tiempos en 802.11e requeridos para una transmisión exitosa**

Y es así como a través de la expresión (7) se puede realizar un cálculo aproximado del *throughput* en WLAN haciendo uso del estándar 802.11e. En el siguiente ejemplo se ilustra de mejor manera lo planteado.

### Ejemplo 2:

Previo al hecho de realizar simulaciones conviene calcular el *throughput* que puede esperarse teóricamente en un escenario ideal en el que dos clientes se comunican

<sup>21</sup>  $T_{PHY}$ , Tiempo de transmisión del preámbulo a nivel físico. Los diferentes valores se encuentran consignados en la Tabla 3 del capítulo 1.

mediante un AP. El cálculo más sencillo es aquél en que se supone que no existe otra interferencia, que el canal está libre de errores y que durante la transmisión hay sólo un AP activo. Además, se considera el uso del *códec* G.711 con el cual se genera una muestra de voz cada 20 ms con un tamaño de 160 bytes. La velocidad de transmisión de datos es 11 Mbps (802.11b).

En este caso:

Mediante la expresión (2),  $AIFS\_ACVO = 50\mu s = DIFS$

Y considerando que en el mejor de los casos la ventana de contienda inicia con un valor aleatorio que pertenece al intervalo  $[0, CW_{min}]$  y asumiendo un valor promedio<sup>22</sup>. Haciendo uso de (1):

$$T_{B.O} = \frac{CW_{min}}{2} \times SlotTime = \frac{7}{2} \times 20\mu s = 70\mu s$$

Mediante la expresión (6) se obtiene que el tamaño del paquete de datos que llega al nivel MAC es 200 bytes y haciendo uso de la expresión (8) se tiene que:

$$T_{DATOS} = 192\mu s + \frac{200 \times 8 \text{ bits}}{11 \text{ Mbps}} = 337.45\mu s$$

De igual manera para el paquete ACK (14 bytes):

$$T_{ACK} = 192\mu s + \frac{14 \times 8 \text{ bits}}{11 \text{ Mbps}} = 202.18\mu s$$

Y considerando la expresión (9) en la cual la duración de 1 SIFS es de 10  $\mu s$  se obtiene que:

$$T_{TX} = 50\mu s + 70\mu s + 337.45\mu s + 10\mu s + 202.18\mu s = 669.63\mu s$$

Finalmente para obtener el *throughput* se recolectan los datos obtenidos anteriormente y se consignan en la expresión (7).

$$\text{Throughput} = \frac{200 \times 8 \text{ bits}}{669.63\mu s} = 2.38 \text{ Mbps}$$

Resultado que será una cota máxima a ser esperada en un ambiente de simulación.

Hasta este momento no se ha hecho referencia al número máximo de llamadas que un AP está en capacidad de soportar razón por la cual es necesario dar una definición previa del término Sesión VoIP. Una (1) sesión VoIP es análoga a una llamada tradicional en la cual existe un dialogo entre los dos extremos, a diferencia de que en este caso, una sesión VoIP se establece entre dos equipos (clientes) que intercambian paquetes de voz.

<sup>22</sup> Valor obtenido a partir del promedio de una progresión aritmética de  $n$  términos de la que se conocen el primer término ( $a_1$ ), el último término ( $a_n$ ) y cuya diferencia de términos consecutivos se mantiene constante, en este caso:

$$P = \frac{a_1 + a_n}{2} = \frac{0 + CW_{min}}{2} = \frac{0 + 7}{2}$$

Una vez aclarado este concepto se está en la capacidad de calcular el número máximo de sesiones permitidas. Esto se hace a través de la expresión:

$$\eta = \frac{\text{Throughput}}{\text{BW de una sesión VoIP}} \quad (10)$$

Dado que una conversación es interactiva, cada cliente tiene un enlace VoIP bidireccional con el AP, en donde el ancho de banda de una sesión VoIP se consigue duplicando el consumo de ancho de banda de una llamada VoIP unidireccional.

De esta manera, continuando con el ejemplo anterior se tiene que aplicando la expresión (5) el ancho de banda unidireccional es de 80Kbps y por lo tanto el de la sesión VoIP es de 160Kbps.

Así que el número máximo de sesiones por *hotspot* permitidas es aproximadamente:

$$\eta = \frac{2.38\text{Mbps}}{160\text{Kbps}} \approx 14$$

Es decir, teóricamente se deduce que el número máximo de clientes por AP que están en la capacidad de mantener una conversación de voz es de 28 haciendo uso del *códec* G.711 bajo el estándar 802.11e. En la Tabla 8 se consignan los valores de *throughput* propios de cada estándar, así como el número de sesiones de VoIP soportados. Los valores que en ella se encuentran pueden calcularse a partir de los datos consignados en las Tablas 4, 6 y 7.

**Tabla 8. Throughput y número de sesiones VoIP en los estándares 802.11 a/b/g**

Estándar	Throughput (Mbps)	$\eta$
802.11a	11.83	72
802.11b	2.38	14
802.11g	12.98	81

Es así como en este capítulo se han explicado las modificaciones a nivel MAC realizadas por el estándar 802.11e con una velocidad de transmisión de datos de 11 Mbps cuyo principal propósito está orientado hacia la provisión de calidad de servicio para aplicaciones que así lo requieran. Además, se han tratado temas como la estimación del consumo de ancho de banda de una llamada VoIP, cálculo del máximo *throughput* esperado y el número máximo de estaciones que un AP puede soportar con el propósito de realizar una comparación entre los resultados teóricos calculados y aquellos obtenidos mediante simulación a partir de un conjunto de criterios útiles en el diseño de una Red WLAN *Outdoor* Multicelda propuestos en el capítulo que se tratará a continuación.

### 3. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS WLAN MULTICELDA EN UN ENTORNO *OUTDOOR*

Las redes inalámbricas de área local proporcionan conectividad y acceso a las tradicionales redes cableadas, como si fuesen una extensión de estas últimas, pero con la flexibilidad y movilidad que ofrecen las comunicaciones inalámbricas. Entre los escenarios más sencillos en donde se aplica esta tecnología están las redes de tamaño muy pequeño y en las cuales cada estación está en la capacidad de escuchar a sus estaciones vecinas. De manera contraria, en sectores públicos (como aeropuertos, universidades, centros comerciales, entre otros) suelen operar varias redes inalámbricas Wi-Fi, utilizando *hotspots* que pretenden otorgar el servicio de acceso a Internet a sus usuarios, con la particularidad de presentar ninguna o escasa planificación de frecuencias. Por otro lado, existen circunstancias en las que se requiere proporcionar cobertura a zonas de mayor extensión por lo que se hace necesario utilizar más de una celda. Sin embargo, esto da a lugar a nuevos problemas relacionados con el radio de cobertura de estas celdas y la distancia de separación entre ellas, pues se debe brindar un tratamiento especial teniendo en cuenta ciertas especificaciones a nivel MAC y físico que imponen límites en la distancia máxima a la que se debe encontrar una estación cliente. Es por eso que se analizará la conveniencia de adaptar técnicas como la sectorización y el re-uso de frecuencias utilizadas por la telefonía celular con el propósito de aplicarlas en el diseño de una red WLAN Multicelda con la particularidad de que se trabajará en entornos extensos u “*outdoor*” y prestando especial atención a la transmisión de voz y datos.

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS DE ENTORNOS *INDOOR* Y *OUTDOOR*

##### 3.1.1 Entornos *Indoor*

En este tipo de escenarios, denominados *SOHO*<sup>23</sup>, pertenecen instalaciones como oficinas pequeñas y residenciales, así como *hotspots* que brindan cobertura en zonas muy pequeñas. En la Figura 18 puede observarse una red *indoor* en la cual las estaciones conectadas al AP se encuentran relativamente cerca, a distancias inferiores a 200 metros. En este caso, el punto de acceso está en la capacidad de recibir las señales provenientes de las estaciones al mismo tiempo que todas éstas pueden escucharse mutuamente. Esta situación es el escenario básico para el cual se planeó el mecanismo de CSMA/CA [22], tal como se mencionó en el capítulo anterior, con la excepción de que en el medio inalámbrico no es posible escuchar las colisiones de paquetes de tal manera que todas las estaciones deben estar pendientes del estado del medio para poder acceder a éste en el momento adecuado. Es decir, en entornos de este tipo, CSMA/CA funciona adecuadamente debido a que todas las estaciones (incluyendo el mismo AP) se escuchan entre sí, lo cual es suficiente para establecer una sincronización al interior de la red *indoor* [23].

Otro de los aspectos a considerar en las redes *indoor* se relaciona con las diferencias entre las redes empresariales y las redes de acceso público como *hotspots* en las cuales el control y gestión de los usuarios de la red se realiza de manera diferente para cada

---

<sup>23</sup> Pequeña Oficina/Oficina en Casa (*Small Office / Home Office*, SOHO)

caso. En las redes empresariales un administrador de red está en la capacidad de controlar y exigir configuraciones por parte de todos los usuarios basándose en políticas de seguridad unificadas y reglas de control de acceso que presentan una mayor facilidad para ser gestionadas (una medida consiste en estandarizar las herramientas *hardware* y *software* de los empleados). Como ejemplo de ello se encuentra el uso del Protocolo de Integridad de Llave Temporal (*Temporal Key Integrity Protocol*, TKIP) que hace parte del estándar de encriptación IEEE 802.11i el cual puede ser adoptado como una solución para las redes empresariales y privadas. Por otro lado, en los *hotspots*, los usuarios utilizan diferentes tipos de computadores y equipos WLAN de diversos proveedores con lo cual es difícil estandarizar o requerir de una configuración o versión de equipos en particular. Estas Redes de Acceso Público WLAN (*Public Access WLAN Networks*, PWLAN) están en la necesidad de proveer diferentes soluciones de seguridad y autenticación, y actualmente el control de acceso en los *hotspots* se basa en métodos de autenticación vía *web* brindando así un método que requiere de un nombre de usuario y contraseña para propósitos de identificación y autenticación.

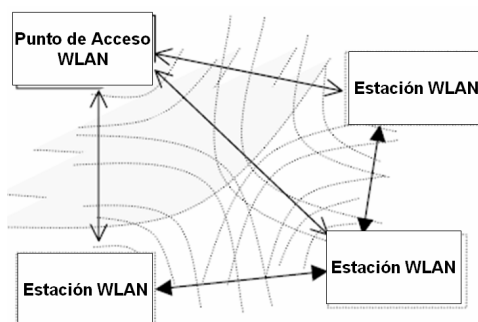


Figura 18. Red indoor

### 3.1.2 Entornos Outdoor

Estos tipo de entornos hacen referencia a escenarios en los que existe una mayor distancia de separación entre los puntos de acceso y los clientes, superando el rango de cobertura convencional con una antena omnidireccional, es decir, alrededor de 200m. De manera general, a este tipo de entornos pertenecen topologías de conexión inalámbrica como:

- **Punto a punto:** Topología en la que existe un radio enlace entre dos estaciones y se utiliza frecuentemente para proveer *backhaul*<sup>24</sup> entre estaciones base. En el caso de equipos WLAN, la distancia del enlace varía de acuerdo a la regulación de cada país relacionada con los niveles de potencia de transmisión máximos permitidos, así como de la frecuencia de transmisión elegida y de opciones de soluciones propietarias.
- **Multipunto:** El término multipunto se refiere a una topología inalámbrica en la cual se provee un servicio a múltiples estaciones que se encuentran distribuidas geográficamente. En esta categoría se encuentran enmarcadas topologías como punto a multipunto, multipunto a multipunto y combinaciones de estas en donde el compartimiento de recursos se puede dar en el dominio del tiempo, de la frecuencia o en ambos.

<sup>24</sup> Conexión entre APs que transmite el tráfico entre dos celdas en un sistema inalámbrico.

- **Punto a Multipunto (*Point to Multipoint, PMP*):** Una estación base brinda servicio de manera continua a usuarios separados geográficamente y cada cliente está conectado permanentemente a una sola estación base.
- **Enlace Inter-celda:** Este tipo de enlaces interconectan dos o más estaciones base ya sea de manera inalámbrica, por fibra óptica o por un medio cableado. Se utiliza de manera frecuente como una conexión *backhaul*.
- **Sistema Multiportadora:** Utilizado en sistemas que proveen servicios mediante el uso de dos o más portadoras en el mismo equipo transmisor. Los puntos de acceso WLAN operan típicamente con una portadora por radio transmisor, es por esto que este tipo de red se conoce como Sistema de Portadora Única (*Single Carrier*).
- **Redes en Malla:** También conocidas como sistemas multipunto-multipunto en el cual un conjunto de equipos dentro de un área geográfica determinada están interconectados entre si y pueden operar como estaciones repetidoras dando lugar a una variedad de rutas entre la red *core* y cualquier estación cliente. Este tipo de red exige que cada nodo de la red esté en la capacidad de funcionar como un enrutador, un repetidor o un nodo cliente. En particular, para las WLAN existe el estándar 802.11s cuya operación se basa en esta topología.

Sin embargo, este trabajo de grado se enfoca a escenarios *outdoor*, por lo que a continuación se identifican los problemas más frecuentes en el despliegue de WLANs sobre éste tipo de entornos con el fin de generar un posible conjunto de criterios de diseño.

### **3.1.2.1 Problemas típicos en el despliegue de redes WLAN en entornos *outdoor***

Ventajas de WLAN como la rapidez de despliegue, facilidad de instalación, su flexibilidad y escalabilidad han hecho que el diseño de estas redes se limite al simple uso de puntos de acceso con antenas omnidireccionales (ver Figura 19) sin tener en consideración problemas, que serán explicados más adelante, como el de nodo oculto, nodo expuesto, distancia del trayecto de propagación, desvanecimiento por multitrayecto, problemas de LOS, o el manejo del *handover*.

### **3.1.2.2 Problema del nodo oculto**

Este problema se presenta cuando dos o más estaciones no pueden escucharse entre si de tal manera que cuando alguna de éstas necesite transmitir información inicia la contienda por el medio pero al no detectar la presencia de una frecuencia portadora (energía a nivel PHY) asumirá que el medio se encuentra libre y comenzará la transmisión de datos (ver sección 2.2.2.1 del Capítulo 2). De igual manera, cuando las demás estaciones deseen transmitir (en el peor de los casos al mismo tiempo), estas asumirán el comportamiento del primer caso e iniciarán la transmisión de su información. Esto se refleja en una pérdida de paquetes (colisiones en el AP) dada la incapacidad del punto de acceso para establecer una sincronización simultánea y conllevando a una desmejora en el desempeño del BSS. La Figura 20 ilustra de mejor manera este problema.

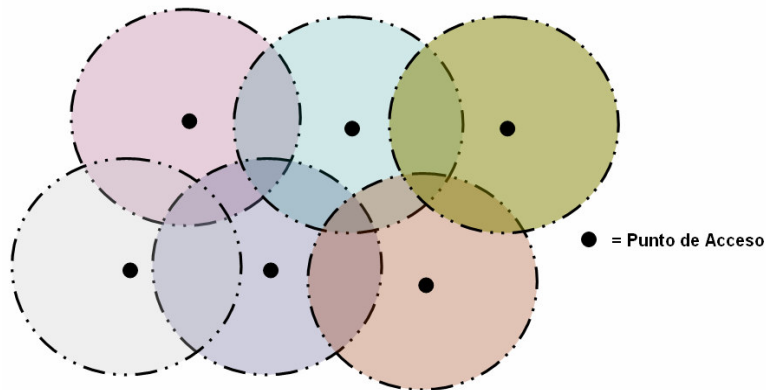


Figura 19. Uso de puntos de acceso en cada celda sin previa planeación.

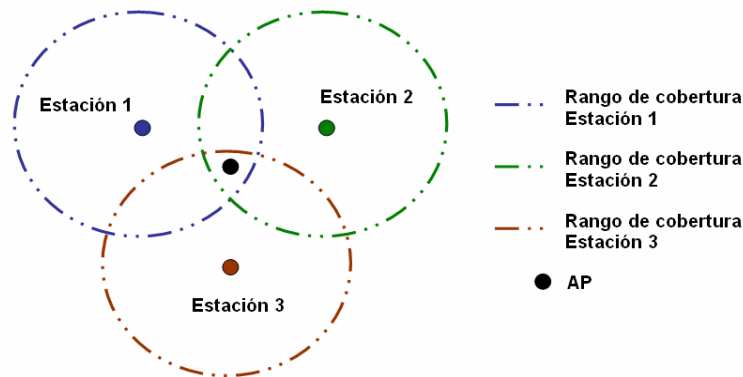


Figura 20. El punto de acceso se encuentra dentro del rango de cobertura de las tres estaciones cliente, sin embargo, éstas no se escuchan entre sí.

### 3.1.2.3 Problema del nodo expuesto

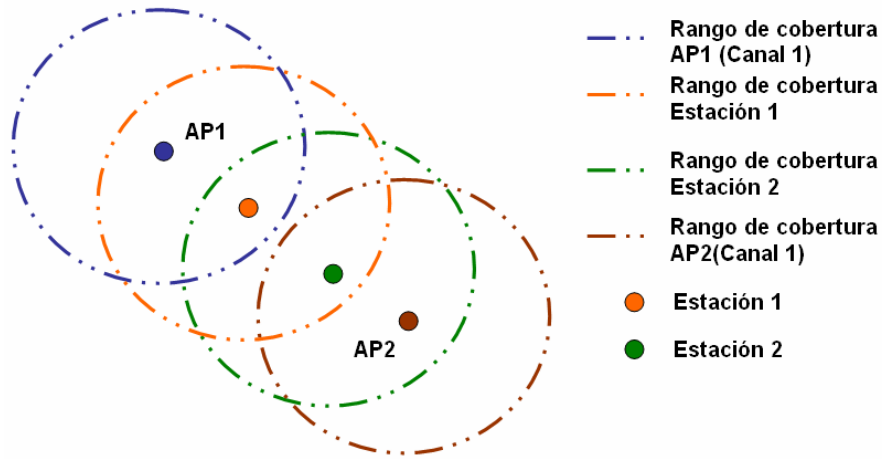
Este caso se presenta cuando se hace uso de la misma frecuencia (canal) en dos BSS adyacentes. En la Figura 21 las estaciones cliente 1 y 2 se encuentran conectadas a puntos de acceso diferentes, ambas en el mismo canal. Sin embargo, la estación 1 se inhibe de transmitir ya que asume que el canal se encuentra siempre ocupado por la transmisión de la segunda estación a pesar de que ésta última se encuentra asociada al AP 2.

### 3.1.2.4 Distancia del trayecto de propagación

En despliegues *outdoor* la calidad de la señal se ve afectada debido a la separación física entre transmisores y receptores ya que ésta disminuye a medida que la distancia de separación aumenta. Esta diferencia en la intensidad de la señal recibida conduce a una desmejora en el rendimiento del BSS ya que no existe una repartición equitativa de la capacidad del sistema perjudicando así a las estaciones que se encuentran más cercanas al punto de acceso.

En particular, en el caso de la tecnología 802.11e, la distancia juega un papel importante en el desempeño de los niveles PHY y MAC, ya que el estándar fue diseñado para operar correctamente en rangos no mayores a 200m [24] pero para distancias más largas entra en consideración el tiempo de propagación de la señal, el cual aumenta a medida que

incrementa la distancia de separación, siendo de gran importancia para aplicaciones que soportan bajos retardos. Este tema será tratado más adelante, en la sección relacionada con el cálculo del radio de una celda.



**Figura 21. Problema del nodo expuesto.**

### 3.1.2.5 Desvanecimiento por multi-trayecto

En enlaces radio, usualmente la señal en el receptor es el resultado de múltiples señales que se han reflejado y refractado a lo largo del trayecto de propagación y la presencia de cambios en la amplitud, fase y polarización generan una distorsión de la señal original.

### 3.1.2.6 Línea de vista (LOS)

Este término hace referencia a un camino limpio, sin obstrucciones, entre las antenas transmisoras y receptoras, que permita la mejor propagación de señales RF de alta frecuencia. Cuando se instala un sistema inalámbrico, se debe tratar de transmitir a través de la menor cantidad posible de obstáculos para obtener así la mejor señal en el receptor, pues de lo contrario, las señales RF se pueden reflejar en éstos cancelando parcialmente la señal transmitida, produciendo como efecto adverso, la reducción del rango y calidad de la señal principal. Si no hay línea de vista entre el transmisor y el receptor, uno o más repetidores deben utilizarse para completar el enlace. Los repetidores son equipos, utilizados cuando la cobertura de ciertas zonas no es óptima, que captan la señal en zonas de óptima cobertura, amplifican la señal y la retransmiten a las zonas que previamente tenían baja cobertura.

Cuando se calcula la elevación mínima para la ubicación de antenas con el objeto de asegurar la línea de vista, se debe tener en cuenta otra consideración de suma importancia, y es que la propagación de las ondas de radio entre los dos puntos no se realiza en línea recta, sino que debido a consideraciones de dispersión, la propagación se realiza en un área elíptica por encima y debajo de la línea recta entre los dos puntos a interconectar. Esta zona elíptica se llama Zona Fresnel.

Como consecuencia, las obstrucciones en el paso de la Zona Fresnel deterioran la calidad de la transmisión (caracterizada por la velocidad de transmisión), como también la reducción de la distancia operacional entre los dos puntos, por lo que se busca mantener



alrededor del 60% de la Zona Fresnel libre de cualquier obstáculo. Dicha zona se puede calcular y debe ser tomada en cuenta cuando se diseña un enlace inalámbrico.

Una vez comprendidos los problemas presentes en los entornos *outdoor* es necesario generar un conjunto de criterios que serán explicados a continuación y analizados a través de una herramienta de simulación lo cual se expondrá en el capítulo 5.

## **3.2 CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE REDES WLAN MULTICELDA OUTDOOR**

Durante la investigación para el desarrollo de este proyecto se encontraron diversos artículos, libros y revistas que abarcan diferentes aspectos del estándar IEEE 802.11. Estudios como en [25] muestran un análisis del comportamiento del *throughput* de una red considerando aspectos como cobertura y problemas de nodo oculto. En [26] se muestra un entorno de simulación y resultados matemáticos del comportamiento del *throughput* en una celda WLAN, además de proponer modificaciones en el algoritmo de *backoff* para mejorar el desempeño de todo el BSS.

Un aspecto común de todos los estudios mencionados anteriormente es que se limitan al análisis de una sola celda, sin embargo, las ventajas del estándar 802.11 junto a su mejora a través del estándar 802.11e, hacen que la idea de diseñar una red WLAN considerando algunas de las ventajas de la telefonía celular aplicadas a entornos que involucren más de una celda, resulte muy atractiva. La velocidad de transferencia alcanzada por 802.11, el bajo costo de sus equipos, su operación en la banda ISM, en contraste con las máximas velocidades alcanzadas por tecnologías como WCDMA y EDGE hacen que se considere la evaluación de la interoperabilidad entre *hotspots* Wi-Fi y las redes de paquetes de la tecnología celular actual [27].

Con el fin de enmarcar los criterios propuestos, estos serán abordados desde la perspectiva de los objetivos que son de consideración general en cualquier tipo de despliegue de red, ya sea cableada o inalámbrica. Estos son:

- **Criterios de capacidad:** con el fin de soportar el tráfico generado por el usuario con las mejores características de desempeño (*throughput*, *delay*, pérdida de paquetes)
- **Criterios de cobertura:** para asegurar la disponibilidad del servicio sobre toda el área.
- **Criterios de calidad:** muy relacionado con los objetivos de capacidad y de cobertura para que, en conjunto, se logre proporcionar una QoS adecuada.

### **3.2.1 Criterios de Capacidad**

Tal como se explicó en el primer capítulo, existen diversas técnicas utilizadas por la tecnología celular, algunas de las cuales están orientadas hacia el incremento de la capacidad del sistema. A continuación se explicará de que manera se pueden adaptar a las redes WLAN multicelda dos de los criterios más relevantes de la tecnología celular: el concepto de celdas múltiples y la sectorización.

En el caso de las celdas múltiples, como su nombre lo indica, este término hace referencia a un conjunto de celdas distribuidas sobre una zona geográfica en particular

(*multiceldas*). Cada celda está compuesta por una estación transmisora, en este caso, un punto de acceso, el cual tiene un radio de cobertura determinado.

El hecho de utilizar múltiples celdas surge a partir de la necesidad de soportar un mayor número de usuarios sobre la misma área geográfica, la cual se debe dividir en zonas más pequeñas controladas por un determinado número de puntos de acceso. Sin embargo, esta división no puede tomarse de manera arbitraria dado que existen unos parámetros con los que se debe tener especial cuidado ya que un manejo incorrecto de éstos podría conllevar a un decremento de la capacidad del sistema

Como primera instancia, los parámetros que un operador debe tener en cuenta son:

- Número de canales disponibles.
- Distancia de re-uso de frecuencia.
- Radio de cobertura de la celda.

Los cuales serán descritos a continuación.

### 3.2.1.1 Número de canales disponibles

Una consideración muy importante a la hora de aplicar el concepto de re-uso de frecuencias en WLAN está relacionada con el eficiente aprovechamiento del espectro electromagnético asignado a la banda ISM debido a que, a diferencia de la telefonía celular, el número de canales asignados ya sea para la banda de 2.4 GHz o de 5GHz es muy pequeño, limitando así la capacidad del sistema. Para el caso de los estándares 802.11a y 802.11b/g el número de canales asignados se encuentran en la Tabla 9, con la particularidad de que el primero de ellos cuenta con 8 canales cuya interferencia es muy baja, mientras que los demás sólo cuentan con 3 canales que no presentan traslape.

**Tabla 9. Canales y frecuencias asignadas a WLAN en la banda ISM, estándares 802.11a, b/g**

Canal	Frecuencia central (GHz) 802.11a <sup>25</sup>	Frecuencia central (GHz) 802.11b/g
1	5.18	2.412
2	5.20	2.417
3	5.22	2.422
4	5.24	2.427
5	5.26	2.432
6	5.28	2.437
7	5.30	2.442
8	5.32	2.447
9	X	2.452
10	X	2.457
11	X	2.462
12	X	2.467
13	X	2.472
14	X	2.484 <sup>26</sup>

En el capítulo 1 se explicó el término *cluster* en el cual se destacan dos características: su tamaño, el cual depende del radio de cada celda que lo compone; y el número de canales disponibles para TODO el *cluster*, para lo cual es muy importante tener en cuenta la

<sup>25</sup> Frecuencias centrales de los 8 canales designados para WLAN separados por 20MHz que no presentan traslape.

<sup>26</sup> Utilizado únicamente en Japón.

consideración mencionada anteriormente. En el caso de un ambiente *outdoor* multicelda, una zona en particular va estar cubierta por un cierto número de *clusters* cada uno con el mismo grupo de frecuencias (*set* o grupo) dando origen al término re-uso de frecuencias que se explicará en la siguiente sección.

Con el propósito de explicar cómo influye el número de canales y de celdas en la capacidad de un *cluster* se procederá con un ejemplo muy básico de telefonía celular.

**Ejemplo 3.**

Se requiere elegir cuál es la mejor opción en términos de capacidad para un operador de telefonía celular que dispone de un ancho de banda de 33MHz y que el ancho de banda por canal es de 50 KHz dúplex.

Lo primero que se debe conocer es el número de canales disponibles por *cluster*, para para lo cual se procede de la siguiente manera:

$$\text{No. de ch disponibles por cluster} = \frac{33\text{MHz}}{50\text{KHz}} = 660 \text{ canales, de los cuales 60 son de control.}$$

Es decir, cada *cluster* tiene la capacidad de soportar 600 conversaciones cuyas frecuencias portadoras pueden ser repartidas según el número de celdas del que esté compuesto (K).

Si se toman los valores de K más comunes se tiene que:

$$\text{No. de ch disponibles por celda} = N = \frac{600}{K}$$

Ahora, si se supone que en una determinada área se necesitan 84 celdas, el número de *clusters* (J) sería:

$$\text{No. de clusters} = J = \frac{84}{K}$$

Y la capacidad total, es decir el número de llamadas que se pueden soportar, se calcula mediante la expresión:

$$\text{Capacidad total} = C_T = (\text{Capacidad de un cluster}) \times (\text{Número de clusters}) = C_C \times J$$

Estos datos se encuentran en la Tabla 10:

**Tabla 10. Cálculo de número de canales por celda, número de *clusters* y capacidad total del sistema para un escenario de 84 celdas**

C <sub>C</sub>	K	N	J	C <sub>T</sub>
600	4	150	21	12600
	7	≈85	12	7200
	12	50	7	4200

De la Tabla 10 se deduce que en términos de capacidad es mucho mejor tener un mayor número de *clusters* con menos celdas (12600 conversaciones). Sin embargo, no es necesariamente la mejor solución debido a que factores como distancia de re-uso,

interferencia co-canal y de canal adyacente, influyen en la calidad del servicio brindado; estos temas serán abordados en secciones posteriores.

Otro de los factores notables en el ejemplo anterior está relacionado con el elevado número de canales disponibles para todo el *cluster*, característica propia de las tecnologías celulares. No obstante, en el caso de WLAN, el número de canales disponibles es significativamente bajo (ver Tabla 9) lo cual limita el número de celdas que se pueden utilizar por *cluster*. Cabe anotar que los mecanismos de acceso de las tecnologías celulares y el de WLAN son completamente diferentes, basándose esta última en una contienda por el medio y cuya transmisión está orientada hacia el transporte de datos que para el caso de 802.11e está relacionado con servicios que presentan ciertos requerimientos de QoS.

Se puede concluir entonces que el disponer de un mayor número de canales facilita al operador el proceso de escoger la opción de mayor conveniencia para una cobertura más amplia además de tener la oportunidad para elegirlos entre un conjunto más amplio de frecuencias y no limitarse al uso de una única frecuencia portadora.

### 3.2.1.2 Distancia de re-uso de frecuencia

Este concepto tiene que ver con la distancia necesaria para que el uso de la misma frecuencia en celdas de *clusters* diferentes no cause interferencia alguna. El cálculo de su valor depende de dos parámetros variables: el radio de la celda (R) y el número de celdas que se maneje por *cluster* (K). En el caso de WLAN, el valor de este último parámetro es fundamental en el cálculo de tal distancia la cual se encuentra mediante la expresión (capítulo 1 sección 1.4.3):

$$D = \sqrt{3K} \times R$$

En la sección anterior se concluyó que el número de canales disponibles para WLAN es muy limitado, pero para el cálculo de la distancia de re-uso existe una limitación aún mayor, ya que es necesario considerar el efecto de la interferencia de canal adyacente y de la interferencia co-canal sobre la selección del número de canales disponibles para un punto de acceso.

Por el momento se abordará el problema de la interferencia de canal adyacente, el cual se presenta debido a la superposición de espectros causada por la proximidad de las frecuencias portadoras de cada canal causando una degradación de la señal y, por consiguiente, un bajo desempeño de la red, razón por la cual se necesita utilizar canales con el suficiente espaciamiento para evitar así el traslape. Este traslape se puede expresar mediante un número o factor, que permite determinar cual es el espaciamiento adecuado para poder escoger el canal más próximo que no cause interferencia y en el caso del estándar 802.11b se tiene que cuando existe un espaciamiento de 5 canales, este factor es cero, es decir el traslape es mínimo.

Una de las características que destacan al estándar 802.11a es el ancho de banda y el número de canales disponibles, convirtiéndolo en una buena elección en términos de capacidad y número de celdas por *cluster* tal como se observa en la Tabla 8. Sin embargo, en la actualidad la mayoría de los equipos que se encuentran en el mercado trabajan con tarjetas duales 802.11 b/g y el uso de la tecnología 802.11a se ha destinado para enlaces punto a punto y no para despliegues en lugares de acceso público, razón por la cual si un operador desea montar un conjunto de *hotspots* deberá tomar en

consideración las tarjetas inalámbricas más comunes en el mercado para así escoger la tecnología que mejor se adapte a las condiciones del cliente. Cabe anotar que dado el caso en el que el estándar 802.11a se torne más comercial, la implementación de éste contribuiría en gran manera al aumento en la capacidad del sistema y además, la descongestión de esta parte del espectro en la frecuencia de 5GHz facilita la proporción de servicios con una mayor calidad. En particular, para el caso de VoIP, el número de llamadas simultáneas aumentaría notablemente debido al ancho de banda disponible y si se piensa en la capacidad de un sistema, como conjunto de *hotspots*, la capacidad de manejar múltiples canales incrementaría aún más el número de usuarios que pueden ser soportados por el sistema. Sin embargo, en términos de número de conversaciones de voz, el estándar 802.11g representa una buena opción dado que maneja el mismo ancho de banda que el estándar 802.11a aunque no se podrá disponer de un gran número de celdas puesto que el número de canales disponibles es limitado

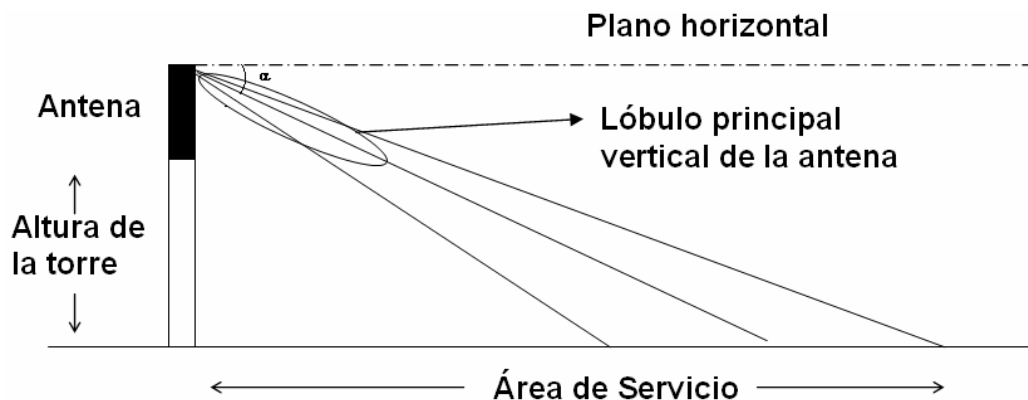
Por lo tanto, el estándar 802.11a se perfila como la mejor opción a nivel de número de conversaciones VoIP, ancho de banda, descongestión del espectro y número de canales, pero debido a su bajo impacto comercial, se convierte en un estándar apropiado para enlaces punto a punto. Esto da lugar al despliegue de redes WLAN basadas en los estándares 802.11b y g con la desventaja de contar con un menor número de canales disponibles pero con características similares en ancho de banda de 802.11a, como es el caso del estándar 802.11g.

Por otra parte, como se mencionó anteriormente, la interferencia co-canal es otro de los factores que influye en el cálculo de la distancia de re-uso, ya que está estrechamente relacionado con el número de celdas que componen el *cluster*. Ésta se presenta debido al uso de la misma frecuencia en una celda que no se encuentra lo suficientemente alejada generando así una degradación en la señal percibida y en el peor de los casos causando la constante pérdida de información, la disminución del *throughput* y la disociación de la estación cliente con el punto de acceso. Aunque en principio, este problema podría solucionarse mediante una separación considerable entre puntos de acceso, puesto que la interferencia co-canal está dada en función del número de celdas por *cluster*, de manera que un *cluster* de gran tamaño implica que la distancia entre celdas es mayor y por lo tanto se disminuye considerablemente la interferencia co-canal. Por el contrario, un *cluster* con muy pocas celdas incrementa la capacidad del sistema pero aumenta el riesgo de que exista la presencia de frecuencias que causen interferencia dada la proximidad de las celdas. Además, otra de las técnicas de la tecnología celular utilizada para solucionar este problema se basa en la implementación de antenas apropiadas. Como ya es conocido, una antena es un dispositivo que concentra la mayor cantidad de energía en dirección de su lóbulo principal, teniendo este un alcance máximo según la potencia entregada por el equipo transmisor. Aprovechando el hecho de que la dirección en que se apunta la energía depende de la posición de la antena, se puede hacer uso de una opción conocida como *tilt* de antena o ángulo de inclinación del haz con respecto al plano horizontal con lo que se conseguiría radiar la energía hacia una zona en particular evitando así que la señal se propague hasta el horizonte y cause algún tipo de interferencia en otra celda co-canal. Esto puede evidenciarse en la Figura 22.

### **3.2.1.3 Radio de cobertura de la celda**

Es característico de la telefonía celular el despliegue de celdas con radios de cobertura de varios kilómetros de extensión. Para el caso de redes WLAN, la distancia máxima que puede cubrir un AP está sujeta a una característica a nivel MAC en particular: el Tiempo

de Espera de ACK (*ACK Time Out Period*). Este tiempo de espera, a diferencia de los tiempos inter-tramas propios del nivel MAC (AIFS, SIFS, tiempo de *backoff*, etc.), depende de manera directa del tiempo de propagación de la señal ya que este nivel fue diseñado para funcionar de manera apropiada en distancias no mayores a 200m. Investigaciones realizadas en [28] y [29] muestran que es posible obtener mayores radios de cobertura si se modifica el tiempo de espera de ACK mencionado anteriormente, tanto en los APs como en las estaciones o ambos, basándose en el hecho de que no existe ninguna restricción al respecto en el estándar y, además, en simulaciones cuyos resultados indican una leve desmejora en el *throughput* a nivel MAC y en la Tasa de Bits Erróneos (*Bit Error Rate*, BER) a nivel PHY pero aún con resultados satisfactorios.



**Figura 22. Tilt de antena en sistemas WLAN.**

La estación transmisora, una vez haya transmitido un paquete, espera un ACK dentro de un rango de tiempo determinado (tiempo de espera ACK). Si el mensaje ACK no llega dentro de este intervalo, el transmisor asume que el paquete no fue enviado correctamente hacia el destino y procede a retransmitirlo, generando así una disminución en el *throughput*. Dado que la distancia de propagación retarda la llegada del mensaje de ACK puede presentarse la situación en la cual el destino si recibió correctamente el paquete. Para ello, mediante la modificación del tiempo de espera es posible esperar un tiempo más largo y así evitar la retransmisión con lo cual optimizar el uso del ancho de banda. Esta modificación es comúnmente realizada por los proveedores de dispositivos WLAN y hace parte de soluciones propietarias, asignando un valor de tiempo de espera de por lo menos un DIFS, es decir,  $50\mu s$  para el caso de la tecnología 802.11b [30].

Para deducir la distancia máxima necesaria para que el nivel MAC funcione apropiadamente se parte de la fórmula  $D = c \times t$ , en donde  $c$  es la velocidad de propagación de la señal electromagnética y  $t$  es el tiempo de propagación en una dirección. El estándar sugiere un tiempo de espera igual a un SIFS ( $10\mu s$  en 802.11b, ver Tabla 4), pero si se considera un tiempo de  $50\mu s$  se proporcionaría un tiempo adicional de  $40\mu s$ , de propagación ida y vuelta, para el paquete ACK. Por lo tanto el radio máximo de cobertura sería:

$$D = c \times t = (3 \times 10^8 \text{ m/s}) \times (20\mu s) = 6 \text{ km}$$

Sin embargo, en [29] se realizan estudios considerando potencias de transmisión que varían entre 250 mW y 1 W, concluyendo que el desempeño de WLAN continúa siendo aceptable si el radio de la celda se ubica dentro del rango de 0.3Km a 3Km. Por lo tanto,

tomando como referencia estos estudios, el máximo radio de una celda WLAN que satisface requerimientos de desempeño, tanto a nivel MAC como a nivel físico es de 3Km.

Cabe anotar que muchos fabricantes emplean tiempos de espera del ACK bastante extensos y que garantizan niveles de *throughput* aceptables lo cual señala cuan importante resulta para un operador escoger equipos que permitan configurar tal tiempo de espera, usualmente mediante modificación por personal técnico del *firmware* del punto de acceso [30].

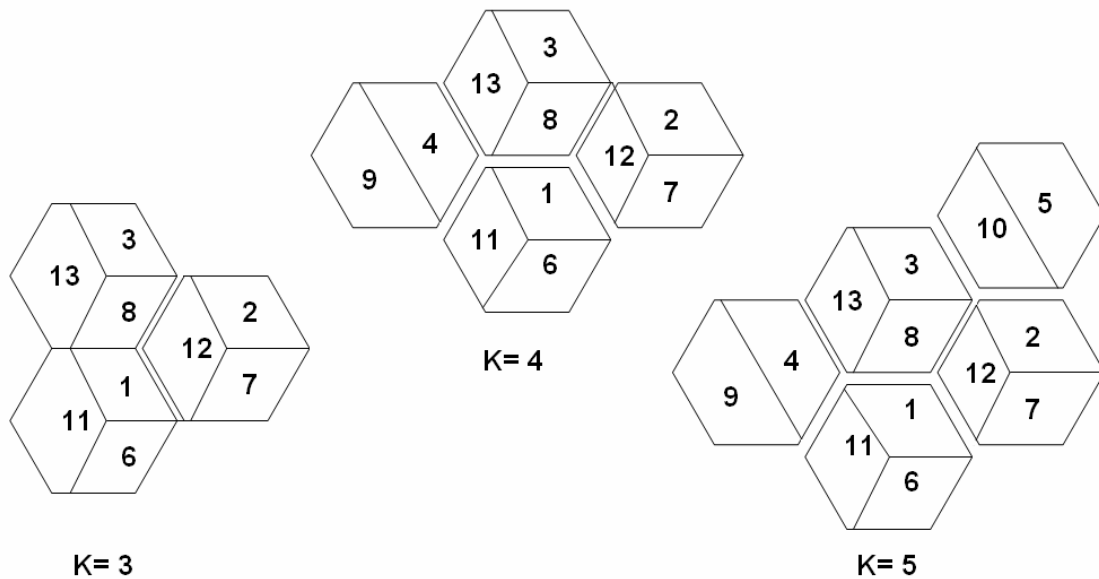
Por otro lado, en las secciones anteriores se estudió cómo, a partir de una estimación del radio de cada celda, el uso de la técnica de *tilt* de antena y el cálculo de una distancia de re-uso de frecuencia adecuada permite aprovechar de una mejor manera el número de canales disponibles reflejándose en términos de un aumento en la capacidad brindada. Sin embargo, hasta el momento los estudios e implementaciones realizados en el documento sólo han trabajado con patrones de radiación omnidireccionales y no se ha considerado otra de las técnicas utilizadas por las tecnologías celulares, esta es la sectorización, tema que se tratará a continuación.

#### **3.2.1.4 Sectorización en redes WLAN multicelda *outdoor***

La manera más sencilla en la que la energía electromagnética puede ser radiada es considerando puntos de acceso con antenas que presentan un patrón omnidireccional cuyo uso en despliegues WLAN no presenta mayor dificultad y se refleja en la disminución de los costos para el operador debido a la menor cantidad de infraestructura necesaria. Su baja complejidad hace que este tipo de despliegue sea llamativo, rápido y flexible, pero omite técnicas como sectorización de celdas, que bajo un adecuado diseño puede conducir a un incremento en el número de usuarios soportados y en el caso de proveedores de servicios sobre redes WLAN, esto se vería reflejado en un mayor ingreso económico por cada *hotspot* desplegado.

Uno de los aspectos relevantes de la sectorización es que cada una de las antenas (transmisoras y receptoras) puede soportar el ancho de banda total del espectro reservado, lo que permite reutilizar frecuencias idénticas dentro de una misma celda sin que celdas adyacentes se interfieran unas con otras. La técnica de sectorización es ampliamente utilizada por la tecnología celular sobre todo en entornos urbanos en donde la demanda de tráfico es considerable y la presencia de múltiples celdas hacen necesario evitar en lo posible la interferencia de canal adyacente y co-canal facilitando así la proporción de un servicio con baja probabilidad de caída de la llamada en curso, de bloqueo en el intento de acceso al canal y una cobertura con un nivel de señal aceptable. En el caso de WLAN, es posible adaptar este esquema, sin embargo, como se mencionó anteriormente se debe considerar el número de canales disponibles, ya que ésta técnica se basa también en la reutilización de frecuencias.

La sectorización consiste en la división de una zona que típicamente corresponde a los 360° cubiertos por una antena omnidireccional en varios sectores, cada uno con su antena respectiva y cuyo número depende de factores económicos, de cobertura, de capacidad, de tipo de antenas disponibles, entre otros. Usualmente, las celdas se dividen en tres o cuatro sectores, cubriendo un área de 120° y 90° respectivamente mediante la implementación de antenas sectoriales. Esto se ilustra de mejor manera en la Figura 23.



**Figura 23. Sectorización y asignación de canales (K=3, 4, 5) en redes WLAN.**

A diferencia de los sistemas celulares, el tamaño del *cluster* en las redes WLAN es muy limitado y poco flexible. Este es el caso del estándar 802.11b/g en el que se disponen de 13 canales pero en el cual sólo se pueden formar grupos conformados por 3 canales que no presentan traslape, es decir, sólo es posible conformar un *cluster* compuesto por 5 celdas como máximo (ver Figura 23) y en donde cada celda está en la capacidad de manejar tres frecuencias únicamente (tres canales). Dado que el método de acceso propuesto por el estándar 802.11e se basa en CSMA/CA el uso de las tres frecuencias por un mismo AP no es posible, por lo tanto es necesario sectorizar la celda en tres partes, cada una con un punto de acceso configurado en un canal diferente y que no cause traslape con el canal del sector vecino. De esta forma se está aprovechando el espectro de manera eficiente ya que se está triplicando la capacidad de cada celda. No obstante, en ocasiones la falta de una planeación cuidadosa y detallada de algunos operadores conlleva al error de desplegar redes WLAN sin pensar en la escalabilidad de la red, razón por la cual se implementan diseños basados en configuraciones multicelda omnidireccionales sin tener en cuenta que dado el caso en el que se presente un notable incremento en el número de usuarios por AP será necesario hacer uso de la sectorización pero con el inconveniente de rediseñar por completo todo el esquema ya desplegado puesto que la sectorización exige modificaciones concernientes con el tamaño del *cluster*, esquema de frecuencias asignadas e incluso, posición de los puntos de acceso. Por lo tanto en el momento de diseñar un sistema multicelda *outdoor* como primera instancia se debe pensar en un esquema sectorizado, su respectivo plan de frecuencias y la ubicación geográfica de cada celda co-canal.

### **3.3 CRITERIOS DE COBERTURA**

Con el propósito de cubrir en lo posible la totalidad de la zona de interés de acuerdo a las frecuencias de operación, características del entorno, radio de la celda, entre otros, es necesario tener como referencia algunos de los modelos de cobertura que se explican a continuación.



### 3.3.1 Modelos de cobertura

Los modelos de predicción de cobertura dependen de factores como la frecuencia de operación y el entorno sobre el cual se enfoque. Se clasifican según el método empleado para la obtención de pérdidas causadas por la propagación, y de acuerdo a las contribuciones de la señal en consideración. Debido a ello, se habla de modelos empíricos, los cuales se basan en campañas de medida; modelos semi-empíricos, que añaden soluciones exactas a algunos mecanismos de propagación; modelos deterministas, que se basan en el cálculo exacto a través de ecuaciones de las pérdidas debidas a la propagación; y los modelos semi-deterministas, los cuales precisan de técnicas estadísticas para modelar algunos elementos relacionados con el entorno.

Otra clasificación ubica a estos modelos como bidimensionales, donde sólo se considera la contribución principal de la señal radiada y por lo cual son capaces únicamente de obtener una predicción de la cobertura radioeléctrica; o modelos tridimensionales, que identifican el mayor número posible de contribuciones que puedan llegar al receptor debido a la propagación por multitrayectoria.

Como se ha expuesto con anterioridad, son de interés los entornos *outdoor*, por lo que se limitara al estudio de modelos dirigidos a este marco.

### 3.3.2 Modelos bidimensionales

Permiten predecir la cobertura radioeléctrica, calculando las pérdidas básicas de propagación, algunos de los cuales tienen su origen en la planificación de micro y macro celdas en frecuencias VHF y UHF.

#### 3.3.2.1 Modelo Okumura-Hata

Obtenido a través de un método empírico desarrollado en ciudades de Japón y que opera en la banda VHF [31]. La expresión que propone para las pérdidas por propagación en entornos suburbanos y rurales viene dada por:

$$L(\text{dB}) = A + B \log R$$

Donde  $R$  es la distancia entre transmisor y receptor y  $A$  y  $B$  son función de la frecuencia y de la altura de las antenas, con:

$$A = 69.55 - 26.16 \log(f_c) - 13.82 \log(h_b) - a(h_m)$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log(h_b)$$

$$a(h_m) = h_m (1.1 \log[f_c] - 0.7) - (1.56 \log[f_c] - 0.8)$$

$L$  las pérdidas en dB.

$R$  la distancia en Km.

$f_c$  la frecuencia de trabajo en MHz.

$h_b$  la altura de la antena de la estación base en metros.

$h_m$  la altura de la antena del receptor móvil en metros.

Sin embargo, solo puede aplicarse si se cumple que:

$$150 \leq f_c \leq 1500 \text{MHz}$$

$$30 \leq h_b \leq 200 \text{m}$$

$$1 \leq h_m \leq 10 \text{m}$$

$$1 \leq R \leq 20 \text{Km}$$

La fórmula Okumura-Hata está especialmente concebida para aplicaciones en radiocomunicaciones móviles y proporciona una pérdida básica de propagación del tipo medio para cualquier punto de la ciudad, ya que no tiene en cuenta los efectos del entorno del móvil. Sin embargo, debido a limitaciones de frecuencia se observa que no es adecuado para tecnologías Wi-Fi.

### 3.3.2.2 Modelo Walfish-Bertoni

Es un modelo físico creado para entornos urbanos que no sean demasiado densos para rangos en UHF. Para ello, los bloques de edificios se consideran como cilindros difractantes que se comportan como filas de pantallas absorbentes. Las hipótesis de éste modelo consideran que la mayoría de las ciudades poseen un núcleo formado por edificios de gran altura rodeado por un área mucho mayor en la que predominan edificios con alturas relativamente uniformes y están dispuestos en filas casi paralelas. En las pérdidas de propagación  $S$  entre la antena transmisora y la antena receptora se incluyen tres factores [31]:

1. Pérdidas entre antenas en espacio libre.
2. Reducción por la obstrucción de los tejados de los edificios, en lo que se denomina propagación sobre edificios.
3. Efecto de la difracción desde las terrazas de la calle donde se encuentra el móvil.

El cálculo de  $S$  se obtiene a través de:

$$S = P_0 Q^2(\alpha) P_t$$

Donde  $P_0$  es la pérdida de espacio libre entre antenas isotrópicas el cual viene dado por:

$$P_0 = \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2$$

y  $R$  es la distancia entre la antena trasmisora y el edificio que bloquea al móvil.

Suponiendo antenas isotrópicas, las pérdidas en espacio libre en dBs se calculan como:

$$L_o(\text{dB}) = 32.45 + 20 \log f_c [\text{MHz}] + 20 \log R [\text{Km}]$$

Donde  $f_c$  es la frecuencia de propagación de la señal.

$Q^2(\alpha)$  da la reducción de la señal a nivel de los techos a causa de los edificios que ensombrecen al receptor y se expresa como:

$$Q(\alpha) = 0.1 \left( \frac{\alpha \sqrt{d[m] / \lambda[m]}}{0.03} \right)^{0.9}$$

Siendo  $d$  el espacio medio de los edificios en el perfil que une al transmisor y al receptor,  $\lambda$  la longitud de onda y  $\alpha$  el ángulo de incidencia dado por (ver Figura 24a):

$$\alpha(rad) = \frac{H}{R} - \frac{2R}{R_e}$$

Donde  $H$  es la altura de la antena transmisora sobre la altura media de los edificios,  $R$  es la distancia entre el transmisor y el edificio inmediatamente anterior al móvil en Km, y  $R_e$  es el radio efectivo de la Tierra ( $8.5 * 10^3 Km$ ).

$P_l$  representa las pérdidas por difracción en la señal que va desde el nivel de los techos hasta el pavimento.

Este modelo se aplica a entornos urbanos donde no existe visibilidad directa entre transmisor y receptor, en los que los edificios tienen una organización en filas perpendiculares a la dirección de propagación, y para el rango de frecuencias ubicadas entre los 300MHz y 3GHz. Además, la distancia entre transmisor y el móvil debe estar entre 200m y 5Km. Aunque el rango de frecuencias que soporta este modelo abarca tecnologías 802.11b/g, no cumple con los requerimientos de LOS que se necesita para estos sistemas.

### 3.3.2.3 Modelo COST231-Walfish-Ikegami

Basado en el modelo de Walfish-Bertoni, e incluye correcciones empíricas para factores omitidos en el modelo original como son orientación de calles, transmisión por debajo de los edificios, tipo de ciudad y márgenes de distancia al transmisor, aunque la dependencia con la distancia sigue siendo la misma [31].

Para la variación de la frecuencia se adoptó el mismo valor que en el modelo de Okumura-Hata para 925MHz ( $26 \log f [MHz]$ ), pero las pérdidas por difracción final se encuentran según la siguiente ecuación:

$$LOS: L_b [dB] = 42.6 + 26 \log d [Km] + 20 \log f_c [MHz]$$

$$NLOS: L_b [dB] = \begin{cases} L_B + L_{rts} + L_{msd}, & L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_B, & L_{rts} + L_{msd} < 0 \end{cases}$$

$$L_B = 32.45 + 20 \log f (MHz) + 20 \log d (Km)$$

$$L_{rts} = -16.9 + 10 \log w [m] + 10 \log f_c [MHz] + 20 \log \Delta h [m] + L_{ori}$$

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354\varphi, & 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35), & 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4 - 0.114(\varphi - 35), & 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ \end{cases}$$

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d [Km] + k_f \log f_c [MHz] - 9 \log b [m]$$

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log(1 + h_b [m] - h [m]), & h_b > h \\ 0, & h_b \leq h \end{cases}$$

$$k_a = \begin{cases} 54, & h_b > h \\ 54 - 0.8(h_b [m] - h [m]), & h_b \leq h \text{ y } d \geq 0.5 Km \\ 54 - 0.8(h_b [m] - h [m]) \frac{d [Km]}{0.5}, & h_b \leq h \text{ y } d < 0.5 Km \end{cases}$$

$$k_d = \begin{cases} 18, & h_b > h \\ 18 - 15 \frac{(h_b [m] - h [m])}{h [m]}, & h_b \leq h \end{cases}$$

$$k_f = \begin{cases} 0.7 \left( \frac{f_c [MHz]}{925} - 1 \right), & \text{para ciudades medianas y centros suburbanos con densidad media de árboles.} \\ 1.5 \left( \frac{f_c [MHz]}{925} - 1 \right), & \text{para centros metropolitanos.} \end{cases}$$

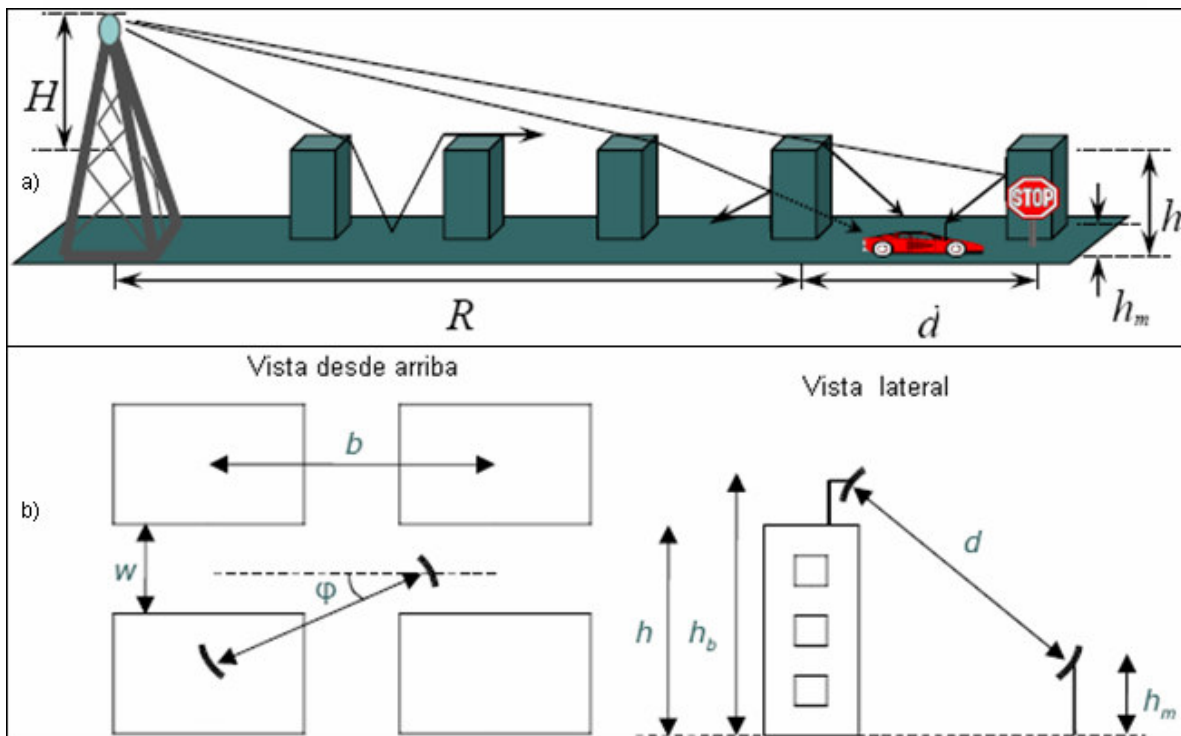


Figura 24. Entornos típicos para a) Modelo Walfish-Bertoni. b) Modelo COST231-Walfish-Ikegami

Donde  $w$  representa la anchura de las calles, dada en metros, donde se encuentra el móvil,  $b$  es la separación de los edificios en metros,  $f_c$  es la frecuencia de trabajo en MHz y  $\Delta h = (h - h_m)$  representa la altura media de los edificios sobre la altura de la antena del móvil en metros (ver Figura 24b).

El rango de valores de los parámetros dentro del cual es aplicable este modelo es el siguiente:

$$800 \leq f \leq 2000 \text{MHz}$$

$$4 \leq h_b \leq 50 \text{m}$$

$$1 \leq h_m \leq 3 \text{m}$$

$$0.02 \leq d \leq 5 \text{Km}$$

Por lo que resulta aplicable en sistemas de radiocomunicaciones móviles celulares en las bandas de frecuencias correspondientes a los mismos y con radios de celda pequeños, típicos de medios urbanos, así como en sistemas WLAN. Por otra parte, como se puede apreciar en [32] este modelo puede aplicarse en tecnologías 802.11 b/g, aunque deja de lado al estándar 802.11a, no obstante, constituye una herramienta útil para diseño de radio enlaces con este tipo de tecnologías.

De esta manera una selección adecuada de un modelo de predicción de coberturas contribuye a la planeación y diseño de redes en entornos *indoor* y *outdoor*. Sin embargo, su aplicación está ligada a la interfaz radio del sistema y requiere de un estudio detallado el cual no será abarcado por este proyecto debido a que, como se verá en el capítulo 5, la herramienta utilizada para efectos de simulación no permite este tipo de estudios.

### **3.4 CRITERIOS DE CALIDAD**

Hasta el momento se han tratado los criterios de cobertura y capacidad por separado y se han mencionado las ventajas asociadas a cada una de éstos. Sin embargo, con el fin de brindar un conjunto de servicios sobre una red WLAN que cumplan determinados requerimientos de QoS es necesario aplicar tales criterios de manera conjunta por lo que una correcta aplicación de cada uno de los criterios anteriormente expuestos hace referencia a una calidad de servicio implícita que puede además ser complementada por las mejoras a nivel MAC consignadas en el estándar 802.11e. Las múltiples ventajas de este estándar ya han sido presentadas en la sección 2.2.2 por lo que resta aclarar la solución al problema de nodo oculto-expuesto y la elección del *códec* adecuado.

#### **3.4.1 Solución al Problema de Nodo Oculto y Nodo Expuesto**

Es común encontrar que muchas de las redes WLAN implementadas en la actualidad no hacen uso de la técnica de sectorización. Para estos escenarios, el problema de nodo oculto se convierte en un tema de consideración para el cual existe un mecanismo propuesto a nivel MAC que soluciona este inconveniente. Este consiste en el intercambio de tramas de control RTS/CTS entre las estaciones que desean establecer una comunicación y se da inicio con el envío de una trama RTS de petición por la estación transmisora solicitando la "reserva" temporal del canal. Si el destino está desocupado, este confirma la solicitud enviando una trama CTS y así se da inicio al intercambio de información entre los dos extremos. El propósito de este intercambio de tramas es permitir la transmisión de datos sin que exista la posibilidad de que se presenten

colisiones en el punto de acceso ya que el resto de estaciones son advertidas sobre el estado del canal (ocupado) mediante la actualización del vector NAV. Una vez haya culminado la transmisión de datos, el canal se libera y comienza de nuevo la contienda por el medio.

A pesar de que éste es un buen mecanismo para evitar colisiones y dar solución al problema de nodo oculto, su uso implica una disminución en el *throughput* debido al intercambio adicional de información de control y por consiguiente un menor aprovechamiento del ancho de banda disponible. Sin embargo, teniendo en cuenta las ventajas brindadas por la sectorización y un adecuado cálculo del radio de la celda, el uso de este mecanismo no es del todo necesario en ambientes multicelda sectorizados, ya que el problema de nodo oculto se presenta principalmente por la incapacidad de una estación de percibir la transmisión de otra que no se encuentra en su rango de cobertura, pero debido a que el área de cobertura por sector ya no es omnidireccional, la probabilidad de que la mayoría de las estaciones presentes en el sector se percaten de la presencia de estaciones vecinas del mismo sector aumenta.

De la misma manera, el problema de nodo expuesto se soluciona mediante la sectorización ya que cada sector maneja un canal diferente y por lo tanto las estaciones de sectores diferentes operan en frecuencias diferentes.

### **3.4.2 Elección del *Códec***

Aunque la elección de un *códec* adecuado está muy relacionada con la capacidad del sistema debido a la cantidad de ancho de banda que puede necesitar, éste mantiene una estrecha relación con la calidad de la voz humana percibida por parte de la fuente y el destino. Dado que el usuario final tiene una concepción de la calidad en la comunicación de voz basándose en su grado de inteligibilidad es recomendable hacer uso de una referencia subjetiva común para cuantificar el rendimiento del *códec* de voz llamada Nota Media de Opinión (*Mean Opinión Score*, MOS). Las pruebas MOS se dan a amplios grupos de oyentes quienes otorgan a cada muestra de voz una puntuación entre 1(malo) y 5(excelente) y cuyo promedio es calculado para obtener una media de la opinión. En la Tabla 1 se encuentran algunos de los *códec*s más frecuentes junto con sus características más importantes.

En la Tabla 1 expuesta en el capítulo 1 se observan dos aspectos de especial consideración: la puntuación MOS que indica el entendimiento de la conversación y el ancho de banda típico que consume cada uno de los *códec*s. Se puede observar que el *códec* G.711 es el mejor en cuanto a calidad de voz se refiere y el *códec* G.723.1 es el que menos ancho de banda consume, sin embargo, se tiene que el *códec* G.729 es un punto intermedio entre ambos, entregando una calidad de voz bastante buena y un ancho de banda considerablemente menor que el *códec* G.711. Por lo tanto el *códec* G.729 es la mejor opción, pero a diferencia del G.711, tiene licencia y es muy costosa al igual que el *códec* G.723.1 [33].

## **3.5 GUÍA DE IMPLEMENTACIÓN DE REDES WLAN MULTICELDA OUTDOOR CON SOPORTE 802.11e**

Una vez explicados los criterios que un operador debe tener en cuenta a continuación se propone una posible guía de diseño resumida en una serie de fases cuyo propósito es

facilitar el despliegue de redes WLAN multicelda *outdoor* que soportan el estándar 802.11e.

### **3.5.1 Identificar los Requerimientos Básicos de los Posibles Enlaces Inalámbricos**

- a. Identificar el tipo de ambiente *outdoor*: ya sea punto a punto, punto a multipunto o multipunto a multipunto.
- b. Escoger el estándar de despliegue: dependiendo del aspecto legal en la región, se debe elegir qué tipo de frecuencia se adapta mejor a las condiciones del entorno, ya sea en la banda de los 2.4GHz o 5GHz.
- c. Verificar si hay línea de vista entre el punto de acceso y los posibles usuarios: de esta manera se puede calcular la altura apropiada de las torres, las pérdidas por espacio libre y la liberación de las zonas de Fresnel.
- d. Realizar una planeación en donde se obtenga una relación señal a ruido adecuada: esto con el fin de brindar una señal con un nivel de potencia suficiente para ser inmune al ruido pero el necesario para evitar causar interferencias en zonas vecinas.

### **3.5.2 Realizar un Estudio del Entorno**

- a. Identificar posibles fuentes de interferencia: Dado que WLAN opera bajo la banda ISM es necesario conocer qué tipo de interferencias rodean al medio, en especial si hay la presencia de *hotspots* de otros operadores.
- b. Identificar si existen riesgos de propagación de señal por múltiples trayectos: de esta manera se adecua los equipos receptores para que realicen el procesamiento respectivo, filtros correctores de fase, entre otros.
- c. Escoger el modelo de predicción de coberturas apropiado.

### **3.5.3 Planear la Configuración de los Parámetros de WLAN**

- a. Minimizar la interferencia co-canal y de canal adyacente: Esto mediante técnicas de sectorización o del cálculo de la distancia de re-uso.
- b. Calcular el radio de cada celda: Según especificaciones de configuración del Período de Tiempo de Espera del ACK.
- c. Realizar una planeación de frecuencias apropiada: Con el propósito de hacer mejor uso del espectro y poder incrementar la capacidad del sistema.
- d. Estimar los niveles de potencia de transmisión: De acuerdo a la legislación propia de la región y a las exigencias de cobertura que presente la zona a cubrir.
- e. Decidir si el uso de RTS/CTS es necesario: Esto dependiendo de las características del tráfico a manejar y del patrón de radiación de la antena del punto de acceso
- f. Elección del *códec* apropiado: Según el ancho de banda disponible y la calidad de voz deseada.

### **3.5.4 Elección de Equipos**

- a. Seleccionar equipos cuyo *firmware* sea actualizable y que permitan la configuración del parámetro ACK Timeout.
- b. Seleccionar antenas apropiadas: Ya sean direccionales u omnidireccionales.

A manera de conclusión se tiene que el logro de los criterios propuestos en este capítulo depende del uso que se le de a la tecnología WLAN sobre la cual se pueden aplicar reglas de planeación similares a las aplicadas en otras tecnologías inalámbricas. En especial, esto se ve reflejado en una adecuada planeación de frecuencias evitando el uso de canales repetidos o canales adyacentes con el fin de reducir los efectos de interferencias de frecuencias mediante técnicas como la sectorización o el cálculo apropiado de la distancia de re-uso. No obstante, muchos diseñadores del estándar 802.11 están más familiarizados con las reglas de diseño propuestas para redes LAN y el protocolo IP que las características propias de las Redes Inalámbricas de Área Local. Esto conlleva a que las redes WLAN sean frecuentemente criticadas por su limitación de despliegue en entornos *outdoor* pero sin considerar que esto se debe a la falta de comprensión del funcionamiento de la tecnología y sus requerimientos para soluciones inalámbricas.



## 4. DISEÑO DE UNA RED WLAN MULTICELDA EN ENTORNOS OUTDOOR

En el capítulo anterior se plantearon los criterios necesarios para el diseño de una red WLAN multicelda *outdoor* los cuales fueron clasificados en criterios de capacidad, cobertura y calidad considerando los aspectos que marcan diferencia entre entornos *indoor* y *outdoor*. En este capítulo se realiza una propuesta de diseño que aplica los criterios anteriormente propuestos sobre un entorno *outdoor* ideal cuyas características serán tratadas a lo largo del capítulo y servirán como antesala para la posterior evaluación del estándar 802.11e mediante una herramienta de simulación que se adapte de la mejor manera a los requerimientos de la red, tal como se verá en el capítulo siguiente.

### 4.1 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS METODOLÓGICOS

#### 4.1.1 Formulación de los Objetivos

A través del proceso de investigación se encontró que existe una clasificación del tipo de herramientas de simulación, entre las cuales se hayan aquellas cuya principal utilidad es evaluar una tecnología en particular a nivel físico (PHY- modelo de referencia OSI); y las herramientas que si bien abarcan este nivel, hacen mayor énfasis sobre los niveles de enlace, transporte y red<sup>27</sup> [34].

Herramientas como Radio Mobile, Matlab, entre otras, permiten analizar detalladamente el comportamiento de un diseño considerando aspectos reales como: pérdidas de propagación por espacio libre, liberación de zonas Fresnel, comprobación de LOS, evaluación de la altura de las torres de transmisión, uso de mapas digitales, presencia de obstáculos, análisis matemático de las técnicas de modulación y codificación empleadas, etc. Por otra parte, herramientas de software libre como NS-2 y NCTUns (*National Chiao Tung University Network Simulator*) permiten obtener resultados relacionados con parámetros como *jitter*, retardo, ancho de banda, *throughput*, entre otros, sobre niveles superiores, pero que carecen de la opción de simular ambientes con condiciones reales, es decir, los diseños que se simulan en este tipo de herramientas son de tipo “plano” y por lo tanto se consideran de alguna manera independientes del aspecto físico. Es por eso, que la mayoría de los diseños WLAN que hacen parte del estado del arte, son de este tipo y sólo consideran el comportamiento sobre una sola celda evaluando los parámetros en los niveles 2 y 3 mencionados anteriormente.

Considerando que el objetivo principal es evaluar el estándar 802.11e cuyo desempeño se mide a nivel MAC, y teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, el diseño propuesto se basa en un entorno que presenta condiciones ideales pero que consta de múltiples celdas sobre las que se analizan adicionalmente parámetros como la distancia entre puntos de acceso (radio de celda) y la sectorización aplicada a cada celda. Todo esto con el fin de proporcionar una QoS en servicios de voz y datos.

---

<sup>27</sup> El análisis de las posibles herramientas de simulación se encuentra con mayor detalle en el siguiente capítulo.

### 4.1.2 Establecimiento de Premisas

A continuación se puntualizan las premisas necesarias para clarificar las condiciones ideales sobre las cuales se basará la propuesta de diseño.

1. Es necesario que el *backbone* del Proveedor de Servicios de Red (*Network Service Provider*, NSP) esté en la capacidad de soportar un gran número de usuarios ya que la cantidad de estaciones que se conectan a cada AP del *hotspot* durante un determinado lapso de tiempo es variable e impredecible. Lo anterior tiene implicaciones tanto en el diseño del *core* de una red, el cual debe atender de la mejor manera a los clientes de la red de acceso, así como en la configuración apropiada de los servidores de VoIP y pasarelas.

2. El NSP deber estar en la capacidad de garantizar calidad de servicio extremo a extremo. Para el caso de la interconexión de varios AP que soportan 802.11e y que se encuentran en un sector o celda diferente se hace necesario que los dispositivos intermedios, tales como *switches* o enrutadores, tengan la capacidad de soportar mecanismos de QoS de tal manera que se realice un tratamiento especial de la trama según el tipo de datos que se esté transmitiendo a través de la red. Algunas tecnologías del nivel 2 del modelo de referencia OSI utilizan marcas en las tramas que representan el nivel de prioridad de los datos que contienen. En el caso de Ethernet, esta marcación se encuentra especificada en el estándar 802.1p [35], el cual define ocho niveles de prioridad, agregando una etiqueta a nivel MAC, la cual se examina en los *switches* y/o enrutadores con el fin de brindar el tratamiento pertinente a nivel de encolamiento y planificación. Por otro lado, si en el *core* se está trabajando con una arquitectura de Servicios Diferenciados (*Differentiated Service*, DiffServ)<sup>28</sup>, la cual opera a nivel IP [36], es necesario que los enrutadores de frontera tengan implementado un mapeo de la prioridad de los datos contenidos en la trama MAC 802.11e a las diferentes clases de servicio manejadas por esta arquitectura.

3. En escenarios reales, es de vital importancia realizar un adecuado diseño a nivel radio para lo cual deben estudiarse detalladamente las posibles fuentes de interferencia, identificar la presencia de obstáculos, utilizar mecanismos que permitan la comprobación de línea de vista, realizar una estimación del radio de cobertura, y determinar tanto la potencia como el factor de ruido. Adicionalmente, se deben considerar el ancho de banda del canal, el cálculo de la Potencia Eficaz Radiada Isotrópicamente (*Effective Isotropic Radiated Power*, EIRP), el nivel del ruido térmico, la ganancia de antenas, las pérdidas de la señal debido a la penetración en edificios, sectorización, margen de desvanecimiento, estimación del mínimo nivel de relación señal a radio en el borde de cada celda, entre otros. De los anteriores aspectos se deduce que todos ellos describen el comportamiento de una tecnología a nivel físico, específicamente el Presupuesto de Potencia del Radio Enlace o *Radio Link Power Budget*. Sin embargo, en el diseño sólo se consideran los efectos del radio de cobertura y de la sectorización en el desempeño del nivel MAC 802.11e debido a las razones mencionadas al inicio de este capítulo.

4. Los clientes son de tipo nómada, es decir, no se analizará el efecto de movilidad sobre la transmisión de voz y datos.

---

<sup>28</sup> DiffServ es una arquitectura de calidad de servicio desarrollada por la IETF y se basa en la división del tráfico en un número limitado de clases de servicio.

### 4.1.3 Determinación de Alternativas

Entre las alternativas que se proponen para realizar un diseño que incremente la capacidad del sistema sobre un ambiente *outdoor* se encuentran:

- Implementación del estándar apropiado en cada *cluster*.
- Hacer uso de topologías punto a punto o punto a multipunto.
- Trabajar con frecuencias que se encuentran sobre la banda ISM (2.4 GHz o 5 GHz).
- Realizar un adecuado plan de frecuencias.
- Estimar el radio adecuado de cada celda para el posterior emplazamiento de los AP.
- Determinar el tipo de *códec* que proporcione un mejor desempeño sobre la red.
- Brindar servicios de VoIP y datos.

### 4.1.4 Evaluación de Alternativas

El análisis de las alternativas planteadas anteriormente tiene las siguientes implicaciones:

- **Elección del estándar:** como se mencionó en el capítulo 2 el desempeño del estándar 802.11e supera muchas de las limitaciones presentes en el nivel MAC del estándar 802.11 en aplicaciones con una baja tolerancia a latencias elevadas.
- **Topologías:** el diseño en condiciones reales así como de simulación hace uso en su mayoría de una topología Punto a Punto y sólo consta de enlaces Punto a Multipunto en la conexión entre el AP y los clientes. Esto se verá más adelante.
- **Bandas de Operación:** en el capítulo anterior se mencionó la importancia de trabajar sobre la banda de 5 GHz debido a la descongestión que esta presenta en cuanto a interferencias, a la posibilidad de incrementar el número de celdas por *cluster*, y a su amplia implementación en enlaces punto a punto. Sin embargo, en la actualidad la mayoría de equipos soportan tecnologías 802.11b/g, es decir, que operan sobre la banda de los 2.4 GHz, por lo que el diseño se adapta a esta situación.
- **Plan de frecuencias:** debido a que se realizará sectorización en cada celda es necesario escoger una separación adecuada entre los canales de trabajo para evitar interferencia del canal adyacente.
- **Radio de celda:** con el propósito de reducir la interferencia co-canal se hace necesario calcular el radio de cobertura de cada celda según procedimientos utilizados en la telefonía celular (distancia de re-uso). En particular, la distancia entre celdas hace referencia a la distancia entre APs (emplazamiento) ubicados en el centro de éstas.
- **Tipo de códec:** lo cual permitirá la correcta selección del *códec* a implementar en el diseño de red.
- **Servicios:** como se mencionó anteriormente el principal propósito de este diseño es evaluar el estándar 802.11e en condiciones de tráfico de VoIP y datos.

## 4.2 PARÁMETROS TÉCNICOS

En la sección 3.5 del capítulo anterior se generó una guía para el despliegue de redes WLAN en entornos *outdoor*. Sin embargo, como consecuencia de las premisas

planteadas, la guía se reduce a los pasos relacionados con la configuración de los parámetros de WLAN y la identificación de equipos tal como se verá a continuación.

## 4.2.1 Configuración de los Parámetros WLAN

En los ítems a continuación se presenta una configuración básica para su posterior simulación.

### 4.2.1.1 Radio de Cobertura por Celda

Como se mencionó en los capítulos anteriores, las limitaciones a nivel MAC de 802.11e en cuanto al tiempo de espera de una trama ACK hacen que el rango de cobertura de un punto de acceso (topología punto a multipunto) se vea limitado. Sin embargo, se estableció que según estudios realizados a nivel radio la elección de una distancia inferior a 3 Km [29] es viable por lo que para facilidad de cálculos el radio de cada celda será de 1 Km.

### 4.2.1.2 Planeación de frecuencias y tamaño del *cluster*

En esta etapa se considerarán los siguientes aspectos:

- La banda escogida es la de 2.4GHz con lo que se tiene un número máximo de 13 canales disponibles<sup>29</sup>.
- Se debe evitar la interferencia de canal adyacente asegurando un mínimo de 5 canales ( $n=5$ ) como espaciamiento entre los canales elegidos.

Por lo tanto las únicas agrupaciones de canales (en pares o tripletas) que cumplen con lo mencionado anteriormente se definen de la siguiente manera:

$$\text{Canales disponibles} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Grupo } i: (Ch_i, Ch_{i+n}, Ch_{i+2n}) \text{ para } 1 \leq i \leq 3 \\ (Ch_i, Ch_{i+n}) \text{ para } 3 < i \leq 5 \end{array} \right. \quad (1)$$

O expresado de manera más sencilla, los canales disponibles son:

- Grupo 1: (1, 6, 11)
- Grupo 2: (2, 7, 12)
- Grupo 3: (3, 8, 13)
- Grupo 4: (4, 9)
- Grupo 5: (5, 10)

De lo anterior se deduce que si desea repartir *equitativamente* el número de canales por celda se pueden utilizar como máximo 9 canales por *cluster* repartidos en 3 grupos con 3 canales cada uno.

Una vez conocido el número efectivo de canales a utilizar se está en la capacidad de establecer el tamaño del *cluster* y el número de sectores por celda. Como se explicó en la sección 3.3.1.2 del capítulo anterior, el tamaño del *cluster* (K) equivale al número de

<sup>29</sup> Esto aplica a países diferentes de Japón

celdas que lo componen y si se analiza detalladamente la expresión 1 se encuentra que el número de grupos posibles, es en sí, el número de celdas por *cluster* y el número de canales por grupo conlleva a determinar el número de sectores por celda. Es decir,  $K=3$  y cada celda está dividida en 3 sectores.

Por lo tanto cada *cluster* constará de un *set* o conjunto de frecuencias dado por:

$$(Ch_i, Ch_{i+n}, Ch_{i+2n}) \text{ para } 1 \leq i \leq 3, \text{ donde } Ch_i \text{ es el canal de cada sector.}$$

Con lo que la asignación de canales por *cluster* será tal como se observa en la Figura 25.

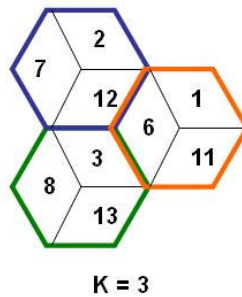


Figura 25. Asignación de canales en un (1) *cluster*.

#### 4.2.1.3 Cálculo de la distancia de re-uso y localización espacial de las celdas co-canal

En la sección 1.4.4 del capítulo 1 se explicó el procedimiento para ubicar celdas que trabajan con el mismo canal. Para este diseño en particular se tiene que  $i = j = 1$ , es decir,  $K = 3$  y la localización de una celda de referencia A (color azul) se muestra en la Figura 26.

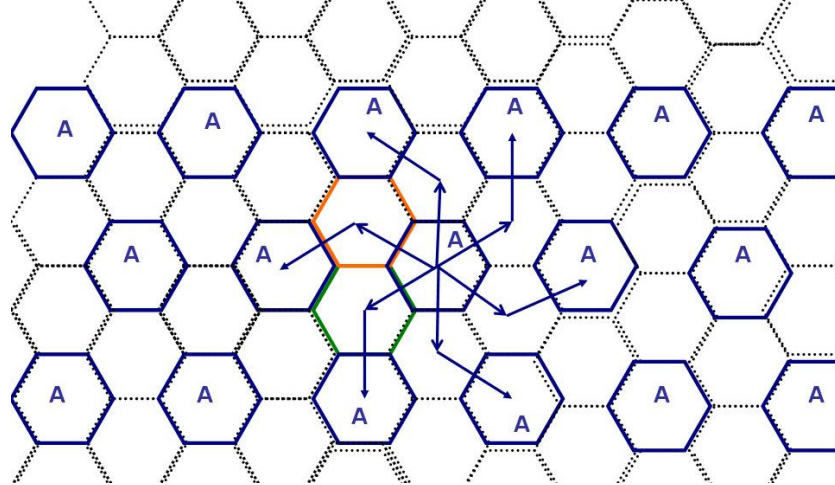


Figura 26. Ubicación de una celda co-canal de referencia A con  $i=j=1$

Lo anterior se puede comprobar tomando en consideración la expresión  $D = \sqrt{3K} \times R$  en la cual  $K = 3$  y  $R = 1$  Km con lo que se obtiene que la distancia de re-uso debe ser al menos 3 Km. En la Figura 26 la celda A cumple con este requisito y el centro de la celda (mástil de las antenas) se encuentra a una distancia de  $D+R$  es decir 8 Km.

#### **4.2.1.4 Potencias de transmisión**

Considerando los rangos típicos de transmisión de los AP y la situación legal en cuanto a la emisión de energía electromagnética en entornos urbanos mediante tecnologías Wi-Fi en territorio colombiano [37] se trabajará con 1 W como máxima potencia de transmisión.

#### **4.2.1.5 Elección del *códec***

De acuerdo al análisis realizado en la sección 3.4.2 del capítulo 3 se hará uso del *códec* G.711, sin embargo, su desempeño será comparado con el del *códec* G.729.

### **4.2.2 Identificación de equipos**

Hasta este momento no se ha especificado que tipo de elementos son necesarios para el despliegue de red WLAN *outdoor* con múltiples celdas. A continuación se analizará que tipos de dispositivos son necesarios a nivel de sector, celda y multicelda.

#### **4.2.2.1 Análisis a nivel de sector**

Como primera instancia es necesario considerar que en la actualidad los puntos de acceso trabajan bajo una sola frecuencia, es decir, no es posible transmitir múltiples frecuencias simultáneamente. En el caso de la sectorización es indispensable que se trabaje con frecuencias distintas con el fin de evitar la interferencia por canal adyacente por lo que se deduce que cada sector consta de un punto de acceso propio.

Cada AP puede ser configurado en modo cliente, por lo que se trabajará bajo una topología punto a multipunto entre el AP y los clientes. Además, debe estar configurado en un canal predeterminado y debe contar con su propia antena sectorial.

#### **4.2.2.2 Análisis a nivel de celda**

En este caso, cada celda estará conformada por tres sectores, es decir 3 APs. Sin embargo, es necesario interconectar tales puntos de acceso para así poder establecer una comunicación a nivel intra-celda, inter-celda e inter-*cluster*. Debido a que los clientes de cada AP conforman un segmento de red y un punto de acceso es un elemento de nivel 2 del modelo de referencia OSI (no tiene dirección IP) se necesita un dispositivo que esté en la capacidad de interconectar tales segmentos de red, es decir, este debe contar con la suficiente inteligencia que le permita entregar los paquetes de datos al destinatario correcto. Considerando lo anterior se descarta la posibilidad de utilizar un *hub* dado que este opera a nivel físico y no cuenta con la capacidad de realizar un direccionamiento en los niveles superiores.

Entre las opciones restantes se encuentran los *switches* y enrutadores siendo estos últimos los que presentan un mayor número de funcionalidades pero cuya capacidad se ve desperdiciada debido a la simple y única necesidad de brindar una interconexión a nivel MAC por lo que se deduce que el elemento más indicado es un *switch* al cual se debe conectar cada AP en un puerto diferente. Como se mencionó anteriormente, este elemento de red debe contar con un mecanismo que proporcione un tratamiento especial de encolamiento de la información, ya sea que se trate de voz, video o simplemente datos, con el fin de mantener una QoS extremo a extremo.

Por lo tanto es necesario un (1) *switch* que interconecte los tres AP que conforman una celda permitiendo así la comunicación entre clientes de estos APs. Esto se ilustra en la Figura 27.

Es importante tener en cuenta que tanto los APs como el *switch* se encuentran en el centro de la celda por lo que comparten la misma instalación física la cual debe contar con un suministro de potencia eléctrica permanente. Un ejemplo de un lugar de instalación puede ser la terraza de un edificio, con lo que se hace necesario estimar posibles costos de arrendamiento del lugar. Otro caso puede ser el uso de torres ya existentes, y como última instancia se debe recurrir a la construcción de torres de transmisión exclusivas para la prestación de servicios mediante WLAN. Sin embargo, esta última elección está sujeta a un estudio de Retorno de Inversión (*Return of Investment*, ROI) con el fin de evitar despliegues sobre-dimensionados que afecten el presupuesto del proveedor de servicios y de red.

#### 4.2.2.3 Análisis a nivel multicelda

Para el caso en el que sea necesario comunicar dos clientes que pertenecen a celdas diferentes se requiere de un enlace que permita el transporte de la información recibida por cada *switch*. Se podría pensar en la implementación de una topología en malla entre las celdas, la cual consiste en enlaces inalámbricos punto a punto entre una celda en particular y las demás. Sin embargo, esta no es la mejor opción debido principalmente a tres factores: el primero se relaciona con el elevado número de enlaces para interconectar  $n$  celdas<sup>30</sup>, el segundo tiene que ver con el incremento en el grado de dificultad al momento de realizar los cálculos de LOS entre celdas debido que a se deben realizar el mismo número de cálculos como de enlaces a montar y, finalmente, al hacer uso de esta topología se está pensando en la interconexión entre las celdas, mas no se ha pensado en la posibilidad de brindar acceso a Internet a los clientes ya que la aplicación de esta topología a la comunicación inter-celda se asemeja a una Intranet aislada y en el caso de los *hotspots* es necesario que un cliente pase por las etapas de autenticación y asociación antes de hacer uso de los servicios de un proveedor en particular.

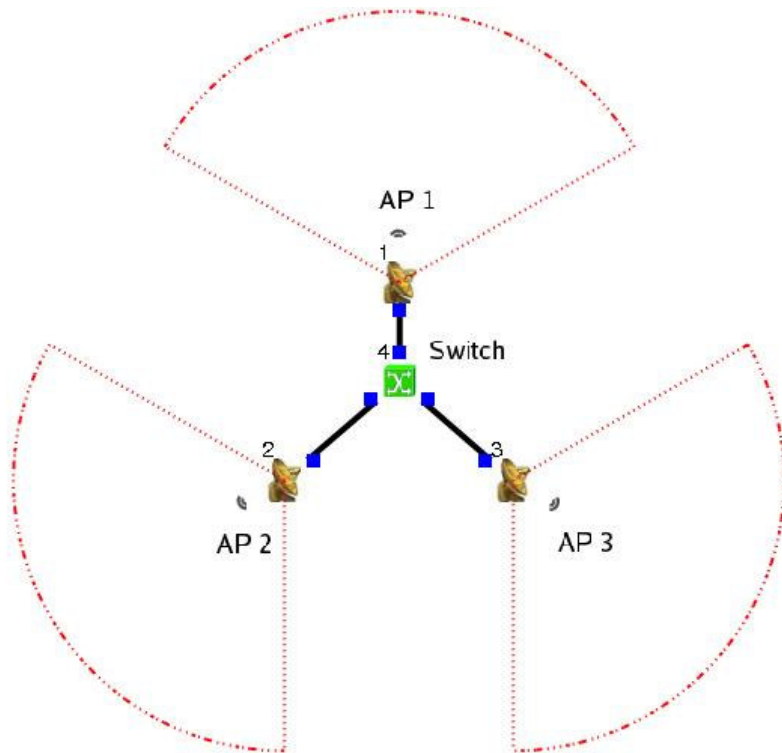
Dado que usualmente las instalaciones en donde se pueden encontrar elementos como: Servicio de Usuario de Marcado con Autenticación Remota (*Remote Authentication Dial In User Service* RADIUS), servidores web, servidores de VoIP, enrutadores de frontera, etc., se ubican en edificaciones (oficina principal del proveedor de servicios o red) localizadas a cierta distancia del *cluster* o *clusters* a los que se desea brindar el servicio, no es viable establecer una conexión cableada debido a la separación espacial entre los extremos a interconectar. En particular, los extremos a interconectar son el edificio de la oficina principal (LAN) y el segundo extremo lo constituye cada celda o, específicamente, el *switch* de cada una de estas por lo que, descartando la topología en malla, se puede hacer uso de enlaces punto a punto entre tales extremos.

La función del *switch* puede ser vista como un elemento que tiene en cada uno de sus puertos un segmento de red en particular, pero que en conjunto forman una LAN por lo que la interconexión entre los dos extremos se reduce a la interconexión de dos LAN. Según esto, el candidato que más satisface los requerimientos es un Puente Inalámbrico

---

<sup>30</sup> El número de enlaces requeridos para interconectar  $n$  nodos está dado por:  $\frac{n(n-1)}{2}$ , en el caso de un *cluster* con 9 celdas se tendrían 36 enlaces.

(*Wireless Bridge*) cuya función básica es interconectar dos redes de manera inalámbrica [38].



**Figura 27. Interconexión entre sectores a través de un *switch* mediante la herramienta de simulación NCTUns.**

Una vez aclarado el tipo de dispositivo a utilizar se debe determinar la frecuencia de trabajo de cada uno de estos. En el capítulo anterior se mencionó que el estándar 802.11a es utilizado en enlaces *backhaul* debido al mayor número de canales disponibles, la banda de trabajo y la capacidad de transmisión de datos, argumentos que perfilan a este estándar como una buena opción para el enlace entre los puentes inalámbricos y la sede principal. Cabe anotar que si se hace uso del estándar 802.11b/g se requeriría una nueva planeación de frecuencias para así evitar interferencias co-canal y de canal adyacente lo cual se vería reflejado en la disminución de la capacidad del sistema causado por la disminución del número de canales disponibles por celda.

Por lo tanto se tiene que se necesitan 2 puentes inalámbricos por enlace<sup>31</sup>, uno de los cuales se encuentra conectado a un puerto del *switch* de cada celda, mientras que el otro se encuentra en el *switch* o enrutador de la sede principal. De esta manera a nivel de *cluster* con  $K=3$  se necesitan 6 puentes inalámbricos, uno en cada celda y tres en el otro extremo. La antena de cada puente se ubica en el mástil que contiene las antenas de los puntos de acceso de cada sector.

Una posible ubicación de las antenas así como el diagrama de red de una WLAN multicelda se muestran en la Figura 28 y en la Figura 29, respectivamente.

En la Tabla 11 se encuentran consignados los elementos necesarios por *cluster*.

<sup>31</sup> Esto basado en casos de estudio de Cisco [38].



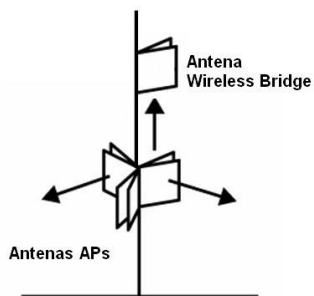


Figura 28. Posible ubicación de las antenas de los puntos de acceso y *wireless bridge*.

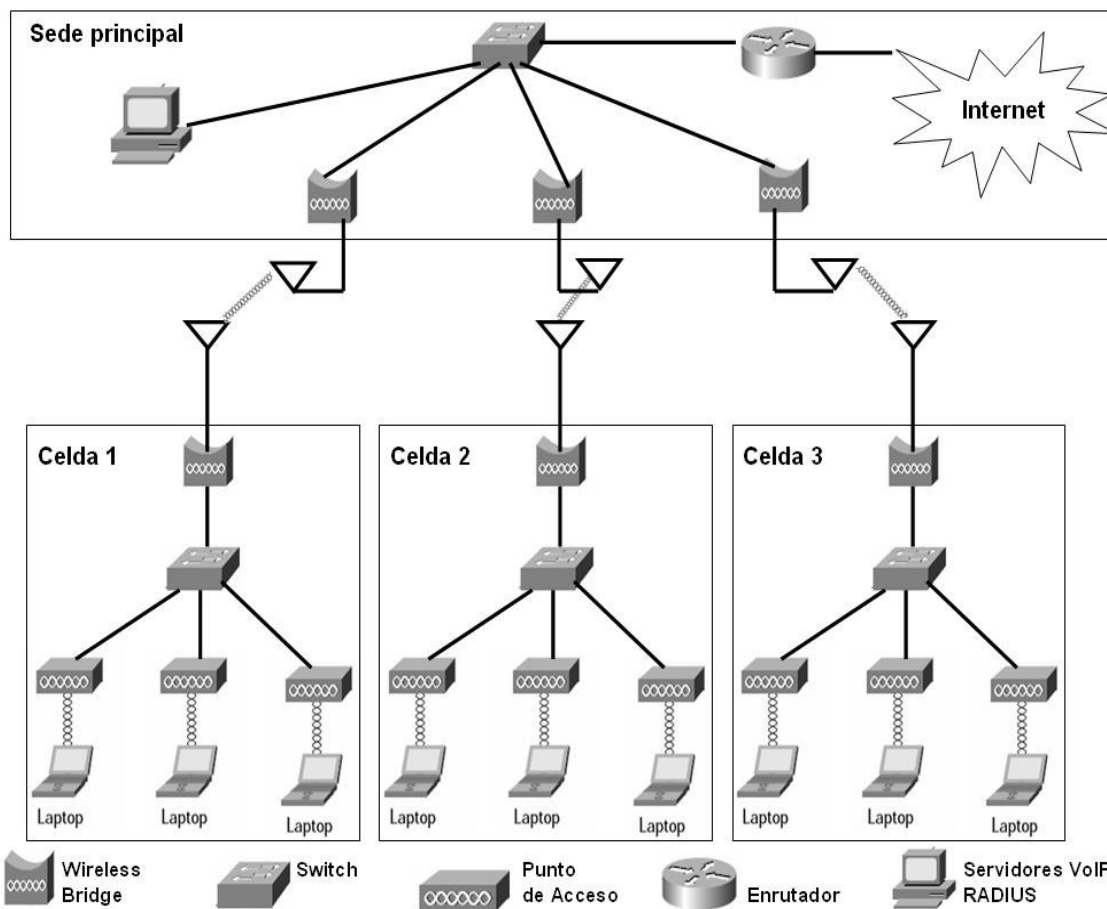


Figura 29. Diagrama de red una red WLAN multicelda *outdoor* con un *cluster* de 3 celdas.

Tabla 11. Elementos de red por *cluster* (K=3)

Dispositivo	Cantidad
Switch	1
Puntos de Acceso	3
Wireless Bridge	1
Antenas	4
<b>Total de elementos</b>	<b>9</b>

### 4.3 PROPUESTA DE DISEÑO FINAL

Después de considerar las premisas y luego de un análisis de los parámetros WLAN de interés, en la Tabla 12 se presentan las características del diseño de una red multicelda *outdoor* sobre el cual se desea evaluar el desempeño del estándar 802.11e específicamente sobre la transmisión de voz y datos.

**Tabla 12. Características del diseño final**

<b>Aspecto</b>	<b>Elección</b>
Frecuencia de operación	2.4 GHz
Tecnología	802.11b
Número de canales a utilizar (N)	9
Número de sectores por celda	3
Número de celdas por <i>cluster</i> (K)	3
Número de <i>clusters</i>	1
Radio de celda	1 Km
Distancia de re-uso	Superior a 3 Km
Potencia máxima de transmisión	1 W
<i>Códec</i> utilizado	G.711

Dicha evaluación estará basada en la aplicación de una metodología de simulación apropiada para la posterior escogencia de una herramienta de simulación que se adapte de la mejor manera a las características de diseño propuestas. Esto se estudiará con detalle en el próximo capítulo.

## **5. SIMULACIÓN A NIVEL DE SISTEMA DEL DISEÑO FINAL CON NCTUns 3.0**

De acuerdo al diseño propuesto en el capítulo anterior, se realizará un análisis de su desempeño mediante una herramienta de simulación que permita la medición de parámetros como *throughput*, *delay* y pérdida de paquetes. Sin embargo, para ello no sólo debe realizarse un estudio sobre los distintos tipos de simuladores que se pueden encontrar y elegir uno apropiado de acuerdo a los objetivos del proyecto, sino que debe seguirse una metodología de simulación con la cual se conseguirá que todo el proceso de análisis esté validado.

En este capítulo se expondrá dicho estudio, la aplicación de una metodología de simulación y la pertinente elección de la herramienta de simulación que se utilizará para dichos propósitos.

### **5.1 NECESIDAD DE SIMULADORES**

Debido al vertiginoso desarrollo actual de las tecnologías de telecomunicaciones y al auge de la competencia en el sector industrial, el uso de herramientas de simulación resulta imprescindible ya que permite la reducción de costos de diseño, mejora su calidad, y en definitiva disminuye el tiempo que tardan en salir al mercado los productos o tecnologías simuladas.

En el marco de la complejidad que caracteriza las recientes redes de telecomunicaciones, está claro que el análisis de resultados previos a su instalación no son viables, o siendo optimistas, tan solo sirven para brindar una idea aproximada que sirva como punto de partida. Por eso la necesidad de herramientas de simulación.

Tales simuladores permiten realizar pruebas a distintos niveles de acuerdo a la metodología de simulación implementada. Es así como pueden analizarse modelos simplificados que a su vez reducen los tiempos de desarrollo e incrementan la fiabilidad de los resultados.

### **5.2 VENTAJAS DE LOS SIMULADORES**

Entre ellas están:

- Aumento de la productividad en el desarrollo de redes: Acelera los tiempos de desarrollo mientras reduce los costos de producción al proporcionar herramientas de análisis y modelos que permiten centrarse en las partes específicas del proyecto.
- Mejora la calidad del producto: Al otorgar etapas de pruebas dirigidas hacia el producto o servicio en escenarios realistas antes de pasar al sistema real.
- Análisis de sistemas complejos: Facilita su estudio, ya que de otra manera no sería posible obtener resultados analíticos o bien estos sólo serían unas referencias debido a las simplificaciones efectuadas.

- Reducción del *Time-to-Market*<sup>32</sup>: Se consigue al desarrollar y validar los diseños antes que la competencia.

Todas estas características se consiguen en conformidad con los objetivos de un simulador como son: simplificar el proceso de desarrollo (con la ayuda de interfaces gráficas, protocolos predefinidos, herramientas de análisis, depuradores, etc.); modelado conforme a los parámetros a medir; escalabilidad y configuración; concretar distintos escenarios; arquitectura abierta (que permita el desarrollo de protocolos propios y/o especificaciones particulares); velocidad de simulación y rendimiento; entre otros.

Ahora bien, existe una gran variedad de simuladores creados a partir de consideraciones relacionadas con la complejidad de las tecnologías y sus parámetros, con los modelos utilizados y la velocidad de simulación que estos permitan, con la diferenciación y valor añadido en sistemas comerciales, o simplemente debido a intereses particulares por parte de sus fabricantes.

Es por ello que debe prestarse especial cuidado en la elección de la herramienta de simulación a utilizar. Sin embargo, previo a ello resulta ventajoso analizar la situación actual de 802.11e y los escenarios estándares en los cuales se pone a prueba.

Existen muchos estudios realizados a nivel de una celda tales como [39][40], en los que a través del análisis de parámetros como *throughput*, *jitter*, pérdida de paquetes, etc., estiman un máximo de usuarios atendidos a los cuales pueda ofrecerse una QoS aceptable. No obstante, y con el fin de generar aportes en escenarios que no han sido abarcados, en este proyecto de grado se trabajó con redes multicelda en ambientes *outdoor*, lo cual hace necesario tener ciertas consideraciones que se involucran en el momento de elegir el simulador adecuado.

### **5.3 SIMULACIÓN**

Es una técnica que imita el comportamiento de un sistema en el mundo real de acuerdo a su comportamiento con relación al tiempo, por lo que permite la observación y posterior análisis de sus características sin la necesidad de recurrir al sistema real para ello. De acuerdo a este concepto, se habla de Modelos de Simulación, el cual es un concepto que se refiere al conjunto de hipótesis sobre el sistema expresado como relaciones matemáticas y/o lógicas que se presentan entre los elementos del mismo; y del Proceso de Simulación, es decir, la ejecución del modelo en el dominio del tiempo para generar representaciones del comportamiento del sistema.

Dicho en otras palabras, el modelo hace referencia a la representación del sistema real a analizarse, junto a las condiciones de funcionamiento y las variables empleadas. En cambio, el proceso se refiere a una ejecución concreta realizada en un computador, con valores asociados a las variables que se pueden ajustar en el modelo, y que se utiliza para obtener los resultados concernientes a ciertos parámetros que especifican el comportamiento del sistema.

El modelo de simulación se basa en aspectos como el ámbito del proyecto, el cual define los elementos de simulación y sus propiedades por defecto, y la posibilidad de disponer de diferentes ámbitos disminuye el tiempo de desarrollo de los modelos de simulación al

---

<sup>32</sup> Tiempo que tarda un producto o un servicio desde su creación hasta que es puesto en el mercado.

acortar las fases de representación y configuración del modelo. También interfieren las entidades y procesos que se desean simular por lo que deben identificarse previamente para su posterior configuración. Junto a ellos se encuentran los elementos del modelo, que son los elementos de simulación que se observan en el modelo a simular; y las acciones por proceso, lo cual define los diferentes procesos donde intervienen las entidades. Por último está la configuración general del modelo, que permite definir los elementos que pueden ser modificados en tiempo de experimentación.

Los resultados obtenidos a través de la simulación están sujetos a variables aleatorias y por ende deben ser cuidadosamente examinados para corroborar su fiabilidad conforme a las previsiones que se tenían antes de realizar el proceso.

Por otro lado, al hablar de un Sistema, se refiere al conjunto de elementos cuyo propósito es cumplir un fin lógico, mientras que el Estado del Sistema apunta al conjunto de variables necesarias para describir su comportamiento en determinado instante de tiempo. Dichas variables se clasifican en entradas, que serán los valores numéricos que permitan iniciar la simulación; y salidas, obtenidas de las entradas, y que serán objeto de estudio.

Entre las entradas se encuentran:

- Condiciones iniciales: Valores que expresan el estado del sistema al principio de la simulación.
- Datos determinísticos: Valores conocidos necesarios para realizar los cálculos que producen las salidas.
- Datos probabilísticos: Cantidades cuyos valores son inciertos pero necesarios para obtener las salidas del sistema. Los valores específicos de estos datos deben conocerse a través de una distribución de probabilidad.

### **5.3.1 Tipos de Simulación**

Se clasifican de acuerdo a ciertas características:

- Simulación estática: Representa un sistema en un instante de tiempo determinado.
- Simulación dinámica: Representa un sistema cuando este evoluciona con el tiempo.
- Simulación determinística: Representa un sistema que no contiene absolutamente ninguna variable aleatoria.
- Simulación aleatoria: Representa un sistema que contiene variables aleatorias.
- Simulación continua: Representa un sistema cuyo comportamiento cambia de forma continua con el tiempo.
- Simulación discreta: Representa un sistema cuyo comportamiento cambia únicamente en instantes de tiempos concretos denominados eventos

## **5.4 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN**

Cuando se desea realizar una simulación que arroje resultados sobre los puntos de interés del modelo de simulación y que garantice la fiabilidad de los mismos, deben seguirse una serie de procedimientos de acuerdo a una metodología de simulación. Dichos procedimientos pueden enmarcarse en una serie de fases, por lo general

secuenciales pero que muchas veces resulta necesario retornar a fases anteriores para realizar cambios que mejoren el proceso de simulación. Sin embargo, la aplicación rigurosa de cada una de estas fases depende en gran parte del problema que se desea resolver por lo que para este trabajo de grado la metodología propuesta se adaptó en lo posible a las características de cada una de las fases definidas en el Anexo A. Tales fases se muestran a continuación.

### 5.4.1 Descripción del Problema

De manera clara y concisa el problema consiste en simular una red WLAN Multicelda *Outdoor* que soporta el estándar 802.11e. En particular, los objetivos de esta simulación son:

- Analizar el comportamiento de las variables *throughput*, retardo y pérdida de paquetes al variar el radio de cobertura y el tipo de *códec* utilizado.
- Determinar el radio de cobertura apropiado por celda.
- Analizar el comportamiento de las variables anteriormente mencionadas al variar la frecuencia de trabajo de los puntos de acceso de celdas diferentes.
- Determinar el mínimo espaciamiento entre canales requerido para conservar un nivel aceptable de QoS.
- Analizar el *throughput*, retardo y pérdida de paquetes al variar el número de estaciones clientes.
- Deducir el número de estaciones que una celda y todo el *cluster* está en capacidad de soportar proporcionando un nivel del QoS aceptable.

A pesar de que HCCA presenta un mejor desempeño que EDCA [39], aspectos como su complejidad y su escasa presencia en el mercado actual [20], han hecho que la Alianza Wi-Fi ratifique la implementación de HCCA como un método de acceso opcional [20] razón por la cual los objetivos mencionados anteriormente se basan en el método de acceso EDCA trabajado por la alianza Wi-Fi bajo el nombre de WMM.

### 5.4.2 Diseño de Estudio

A causa de la cantidad de parámetros que pueden modelarse y analizarse, existen muchos tipos de simuladores los cuales pueden clasificarse como:

- Simulador de red: Analiza el tráfico generado por los usuarios de una red, estudio de QoS, *handover*, control de admisión, gestión de carga, y demás, a través de resultados del simulador del nivel de enlace.
- Simulador de nivel de enlace: Se concentra en protocolos a nivel de enlace para realizar simulaciones de control y corrección de errores, etc. Utiliza resultados del simulador de capa física o en ocasiones lo incluye.
- Simulador de capa física: Se dedica al estudio de área de cobertura, niveles de potencia de antenas, tamaño de celda, análisis de obstáculos, entre otros, y como su nombre lo indica se dedica a la capa física de un sistema.
- Simulador de protocolos: Sirve para verificar, analizar y optimizar protocolos.
- Simulador de terminal: Se utiliza para simular aplicaciones en los dispositivos de usuario.
- Simulador específico: Se especializa en el análisis de parámetros como gestión de carga y gestión de recursos.

- Simulador generador de escenario: Como su nombre lo indica, se utiliza para la creación de escenarios.
- Simulador integrado: Contiene varias funciones de los simuladores anteriores.
- Simulador/Emulador de hardware: Utiliza el emulador como sustituto de un elemento de red para comprobar el funcionamiento de los demás elementos.

Entre la variedad de simuladores disponibles para tal propósito cabe destacar que no siempre cumplen con la totalidad de estos requisitos por lo que a continuación se procede a dar una descripción de tres herramientas de simulación de mayor difusión: NS-2, Opnet IT Guru Academia Edition, y NCTUns 3.0.

#### **5.4.2.1 NS-2**

El simulador NS-2 o *Network Simulator-2* se basa en eventos discretos que son utilizados para el análisis e investigación de redes, por lo que ofrece múltiples facilidades para la simulación de redes TCP/IP, protocolos de enrutamiento y *multicast* sobre redes de cualquier tipo, entre las que se encuentran las redes inalámbricas. Es común que este simulador se complemente con Eurane, el cual adiciona tres nodos con funcionalidades que dan soporte a algunos canales de transporte. Tales nodos son: Controlador Radio de Red (*Radio Network Controller, RNC*), Estación Base (*Base Station, BS*), y Equipo de Usuario (*User Equipment, UE*). Sin embargo, existe un inconveniente al respecto, ya que Eurane fue desarrollado para simulaciones dentro de una sola celda. Por otra parte, el que este simulador funcione en modo consola, complica la simulación de redes complejas.

Posee Licencia Pública General (*General Public Licence, GPL*), lo cual impulsa el desarrollo libre del mismo, y se apoya en dos lenguajes de programación para su correcto funcionamiento: OTcl, a través del cual el usuario introduce las especificaciones del escenario que desea analizar; y C++, en el cual se encuentran la implementación de los protocolos. Como resultado de las simulaciones se obtienen datos matemáticos para un estudio posterior, o trazas específicas que pueden visualizarse en la herramienta de Animación de Red (*Network Animator, NAM*) de este simulador.

Para abordar la implementación de un protocolo en NS-2 se requiere su incorporación dentro del núcleo del simulador mediante los lenguajes de programación C++ y OTcl. También es necesario detallar el escenario a simular, es decir, describir la simulación a través de OTcl. Posteriormente se procede a la ejecución de la simulación y análisis de resultados.

#### **5.4.2.2 Opnet IT Guru Academia Edition**

Opnet Modeler es un software comercial, sin embargo, los desarrolladores de este simulador ponen a disposición una edición académica que proporciona un entorno de desarrollo para el modelado y simulación de redes, componentes, protocolos y aplicaciones de forma flexible y escalable. Este simulador se basa en un modelado orientado a objetos, y utiliza una interfaz gráfica que facilita la creación de redes empleando módulos que representan componentes reales de redes de telecomunicaciones. Incluye varias librerías de modelos cuyo código fuente es accesible y disponible para la versión de Opnet Modeler, lo cual facilita la comprensión de la jerarquía interna del programa que consiste en: un modelo de red donde se encuentran definidas las redes y subredes de la simulación; a continuación se encuentra el modelo de

nodos donde se define la estructura interna de los mismos; y por último está el modelo de procesos donde se definen los estados que caracterizan un nodo. Sin embargo, la versión de libre distribución no posee estas ventajas.

Un nodo posee varios módulos en su interior, así como una función definida que lo caracteriza, y un módulo receptor de paquetes que le son enviados por otro nodo. Además, Opnet pone a disposición un modelo de procesos donde se define la funcionalidad de cada uno de los módulos de un nodo, representada mediante FSMs cuyas transiciones pueden ser condicionales o incondicionales.

Para realizar una simulación con Opnet debe especificarse el modelo de simulación lo cual consiste en el desarrollo de la representación del sistema a estudiar, por lo que se dispone de modelos ya realizados y de editores para crear nuevos modelos. Posteriormente se eligen los datos que serán recolectados y se realiza un análisis con el cual se validan las especificaciones expuestas en el modelo, y en caso de que los resultados no sean los esperados se hará una re-especificación donde se modificarán los aspectos erróneos del modelo de simulación.

Otras de las características más importantes de esta herramienta de simulación son:

- *Wireless*, punto-a-punto y enlaces multipunto de forma abierta y programable. Se pueden definir con exactitud los parámetros de retrasos, disponibilidad, errores de bit y tasas de salida en cada enlace. Se incluyen características de capa física y efectos de entorno.
- Modelado geográfico y de movilidad.
- Interfaz de Programación de Aplicaciones (*Application Program Interface*, API) para la programación asistida o inspección de los modelos y de los archivos de resultados. Sin embargo, sólo se provee el código de todos los modelos estándares en las ediciones con licencia.
- Herramientas de análisis integradas.
- Animación del comportamiento del modelo durante o al finalizar la simulación.
- Depurador Integrado.
- Modelado de FSM para el diseño de protocolos y de otros procesos.

### 5.4.2.3NCTUns 3.0

El simulador y emulador de redes NCTUns es capaz de simular varios dispositivos y protocolos característicos de redes cableadas e inalámbricas y se basa en una metodología de simulación de reingreso de *kernel* lo cual le permite proveer muchas ventajas que los simuladores tradicionales como Opnet y NS-2 simplemente no pueden proporcionar, ya que hace uso de las pilas de protocolos TCP/IP que utiliza Linux aprovechando sus características de emulador por lo que le es posible generar datos de muy alta fidelidad como resultado de su simulación.

Puede simular redes IP que incluyan nodos fijos y enlaces punto a punto, así como redes inalámbricas IEEE 802.11b, incluyendo los modos *Ad-hoc* e infraestructura. También están las redes celulares GPRS, redes ópticas, redes IEEE 802.11b en malla, redes IEEE 802.11e, redes *Ad-hoc* móviles, y redes inalámbricas que implementen antenas direccionales.



Entre los dispositivos que está en capacidad de simular se encuentran *hubs* Ethernet, *switches*, enrutadores, *hosts*, APs IEEE 802.11b, antenas direccionales de 60°, 120° y 180° con patrones de ganancia reales, además de las antenas omnidireccionales tradicionales.

Además, puede simular mecanismos como el de Acceso al Medio por Detección de Portadora y Detección de Colisiones (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection*, CSMA/CD) IEEE 802.3 y CSMA/CA IEEE 802.11b para sus respectivas capas MAC, así como protocolos IP, IP Móvil, Protocolo de Información de Ruta (*Routing Information Protocol*, RIP), protocolo de enrutamiento del Camino más Corto Primero (*Open Shortest Path First*, OSPF), UDP, TCP, HTTP, FTP, Telnet, DiffServ, RTP, RTCP, SDP, etc.

Y para complementar, ofrece una Interfaz de Usuario Gráfica (*Graphical User Interface*, GUI) muy completa con la cual pueden trazarse topologías de redes, configurar los módulos de protocolos que se encuentran en el interior de los distintos nodos, especificar la ubicación inicial y trayectoria de los nodos móviles, arrojar gráficas con resultados concernientes al rendimiento de la red simulada, manipular a gusto la reproducción de la animación donde se observa la transferencia de paquetes entre los diferentes nodos de la red, entre otras posibilidades.

NCTUns corre sobre distribuciones de Linux, como Debian y Red Hat, pero la que brinda un mayor soporte para el reingreso de *kernel* es Red Hat Fedora Core 4.0 por lo que se recomienda esta distribución para el correcto funcionamiento de esta herramienta de simulación.

Su motor de simulación (núcleo de simulación) le permite programar eventos, manejar temporizadores, manipular paquetes, etc., en los módulos de protocolos los cuales están compuestos por un conjunto de funciones y protocolos específicos que necesitan compilarse junto con el motor de simulación para crear un servidor de simulaciones dentro del cual, muchos de estos módulos de protocolos pueden encadenarse hasta formar una pila de protocolos, lo que a su vez produce una mejora en el rendimiento de la simulación y disminuye el tiempo que esta abarca.

Entre los componentes de la estructura de alto nivel de NCTUns se encuentran el *dispatcher*, quien se encarga simultáneamente del manejo y control de las simulaciones y hace posible que múltiples simulaciones se lleven a cabo en diferentes equipos, a la vez que se mantiene activo mientras estas suceden. Su trabajo consiste en manejar un gran número de usuarios y simulaciones al seleccionar motores de simulación disponibles con los que pueda ejecutarlas. También está el *coordinator*, el cual es un proceso que se ejecuta en cada simulación que se encuentre en un servidor de simulaciones y que se asocia al *dispatcher* para informarle si alguna simulación se está llevando a cabo, por lo que antes de esto debe registrarse ante él, con lo cual seleccionará un motor de simulación disponible para realizar su trabajo y enviarlo al *coordinator*. En este punto se solicita al servidor de simulaciones procesar los protocolos y redes específicos, y generar el tráfico en la red simulada. Por otro lado se encuentra el proceso *nctunsclient*, el cual diseña y configura el modelo de simulación, y cuyo comportamiento se refleja en el *coordinator*.

Dicho esto, y por lo que se puede apreciar en la Tabla 13, se eligió a NCTUns 3.0 como la herramienta de simulación bajo la cual se desarrolló el diseño para una red WLAN multicelda *outdoor* con soporte para IEEE 802.11e. Sin embargo, a pesar de que se trata

de la herramienta que permite simulaciones con soporte para QoS en WLAN, existen ciertas limitaciones que impiden simular un entorno tal como se podría dar en el mundo real.

**Tabla 13. Tabla comparativa**

<b>Simulador</b> <b>Requerimientos</b>	<b>NS-2</b>	<b>Opnet IT Guru Academic Edition</b>	<b>NCTUns 3.0</b>
APs 802.11e Sectoriales			x
Soporte para 802.11e	x		x
Interfaz gráfica para la creación de topologías de red		x	x
Multicelda			x
GPL	x		x
Herramienta de animación	x	x	x
Soporte <i>online</i>	x	x	x
Consumo de recursos HW	Alto	Medio	Alto
Configuración de pilas de protocolos en los nodos	x		x

### 5.4.3 Diseño del Modelo Conceptual

El diseño del modelo conceptual parte de los objetivos propuestos en la definición del problema que sirven de base para la identificación de los posibles parámetros de entrada de la herramienta de simulación. Como se mencionó anteriormente, la herramienta NCTUns consta de múltiples ventajas y características que se adaptan a las necesidades de este trabajo de grado. De la misma manera, consta de ciertas desventajas que conllevan a una modificación de los escenarios propuestos dando origen a una adaptación de los objetivos de la simulación a la herramienta de simulación. Es decir, existe una adaptación mutua que establece un equilibrio entre las funcionalidades de NCTUns y los objetivos de la simulación que permite la ejecución de la simulación y la posterior obtención de resultados de acuerdo a las variables de estudio de interés. Adicionalmente, es esencial que en el momento de realizar la simulación se tenga en mente una idea aproximada de los posibles resultados arrojados por NCTUns, esto con el fin de evitar un posterior análisis erróneo de los datos y, por consiguiente, un conjunto de conclusiones que requieran del replanteamiento de escenarios, la escogencia de una nueva herramienta de simulación o en el peor de los casos una redefinición de los objetivos de la simulación. Esto se puede visualizar de mejor manera en la Figura 30.

Entre los elementos provistos por NCTUns se encuentra una interfaz gráfica que es de gran ayuda para la creación de topologías, modificación de las características de los nodos, generación de tráfico y la reproducción de animaciones que facilitan la comprensión de la simulación. Además, esta herramienta cuenta con una aplicación para la representación gráfica de resultados pero que se limita sólo al dominio del tiempo con lo que se hace necesario acudir a paquetes complementarios como *Microsoft Office* u

*Open Office* para facilitar el análisis de las variables frente a parámetros de entrada diferentes del tiempo. En cuanto al rendimiento de la herramienta de simulación, NCTUns 3.0 requiere como recursos mínimos un procesador de 1.6 GHz de 32 bits, 512 MB en RAM y 300 MB libres en disco duro disponibles sólo para su instalación. En particular, la estación sobre la cual se desarrollará la simulación dispone de un procesador AMD de 1.6 GHz, 1 GB en RAM y disco duro de 40 GB. Cabe anotar que el consumo de recursos del equipo por parte de NCTUns es elevado y se recomienda trabajar con equipos de mejores características.

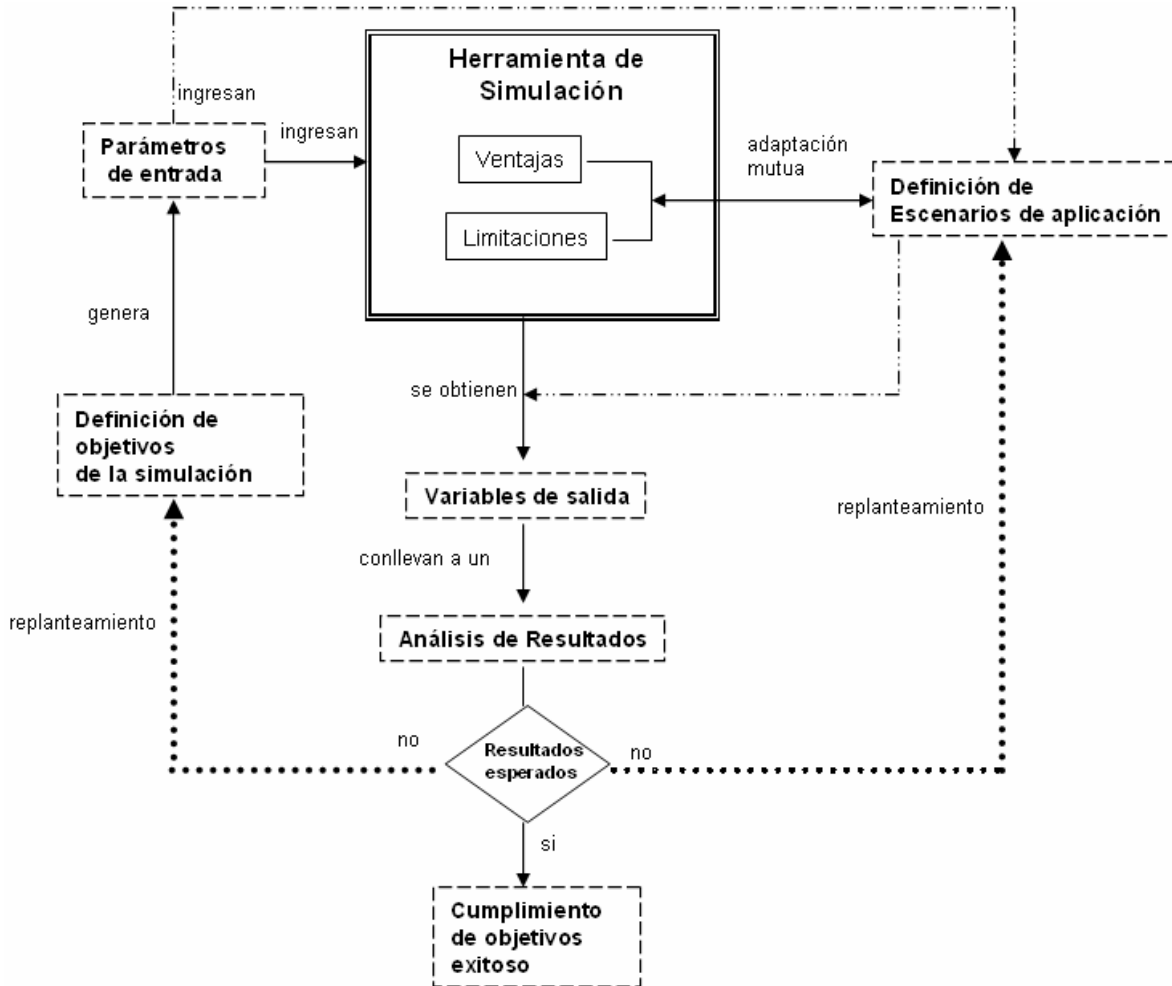


Figura 30. Modelo conceptual

#### 5.4.4 Formulación de Entradas, Suposiciones, Definición y Validación de Procesos

Al inicio de este capítulo se mencionó que uno de los principales propósitos de los simuladores es imitar el comportamiento de un sistema en el mundo real. Para que esto se lleve a cabo es necesario identificar los parámetros de entrada del sistema así como determinar cuáles son las variables a evaluar. Sin embargo, con propósitos de organización, análisis y divulgación de resultados se requiere de una definición de unos entornos o escenarios de simulación los cuales enmarcan un conjunto de variables a

evaluar de acuerdo a una situación o comportamiento en particular. Debido a que en esta fase ya se ha escogido la herramienta de simulación más conveniente, también se conocen sus limitaciones lo cual conlleva al establecimiento de unas suposiciones. Lo anterior, junto con una identificación de variables de entrada y salida sirven como punto de partida para la definición de los escenarios de simulación.

Específicamente, para el caso de la evaluación del desempeño de la transmisión de voz y datos sobre entornos WLAN multicelda *outdoor*, entre las limitaciones del simulador se encuentran:

- No existe diferenciación de tráfico en dispositivos como enrutadores o *switches*, es decir el estándar 802.1p no está implementado.
- No es posible simular una conexión que haga uso de puentes inalámbricos. En otros términos, sólo es posible simular transmisiones entre un AP y una estación cliente.
- A medida que se incrementa el número de estaciones clientes, el consumo de recursos hardware por parte del simulador aumenta notablemente llegando a puntos en que el equipo de simulación se bloquea.

A pesar de contar con un simulador *open source* la generación de un nuevo módulo exige un conocimiento profundo del estándar o tecnología a implementar además de demandar suficiente experiencia en el lenguaje de programación por lo que la modificación a nivel de *kernel* de esta herramienta esta fuera del alcance de éste trabajo de grado. Sin embargo, con el propósito de sobrellevar las anteriores limitaciones se procedió a trabajar bajo las siguientes alternativas:

- Se hace uso de un enrutador WAN el cual permite configurar aspectos como el retardo y el ancho de banda requerido por enlace.
- Desafortunadamente, la ausencia de equipos con la suficiente capacidad de procesamiento hizo imposible la simulación con un gran número de estaciones transmisoras.

Una vez comprendidas las limitaciones del simulador así como las soluciones propuestas es necesario identificar los parámetros de ingreso y las variables a medir. A través del presente documento se ha mencionado la importancia de mantener una QoS aceptable de extremo a extremo y especialmente se tomó en consideración tres parámetros muy importantes para la transmisión de voz sobre redes WLAN. Estos parámetros son el *throughput*, el retardo y la pérdida de paquetes. Es de especial interés analizar su comportamiento en entornos *outdoor* aplicando técnicas de sectorización y distancia de re-uso por lo que éstas variables se convierten en los objetos de estudio a ser analizados a través de la simulación.

En cuanto a los parámetros de entrada, estos se relacionan con aquellos parámetros que pueden ser manipulados mediante algún tipo de interfaz gráfica de la herramienta de simulación. Ya que uno de los principales objetivos de la simulación es evaluar el desempeño de la red a medida que aumente el número de clientes por AP, es decir una simulación orientada hacia la capacidad del sistema, esta requiere de la variación de tipos de tráfico (voz o datos) y radio de cobertura con el fin de considerar el efecto de los anteriores parámetros sobre las variables de salida.

En cuanto al *jitter* o variación del retardo, este parámetro se encuentra muy relacionado con el análisis del comportamiento de las redes de datos a nivel de transporte, debido a la variabilidad inherente en los tiempos de llegada de cada paquete (individualmente) por lo que generalmente forma parte de los parámetros de desempeño en la proporción de QoS. Sin embargo, los servicios que presentan una muy baja tolerancia a los retardos hacen uso de mecanismos como el *buffering* el cual consiste en colocar un espacio de memoria para almacenamiento temporal de datos (*buffer*) que amortigüe el *jitter*, tal como se explicó en el capítulo 1. Teniendo en cuenta lo anterior, el estudio de este parámetro no será considerado en los escenarios que se proponen más adelante.

Por lo tanto los parámetros de entrada, las variables de salida y las unidades en que serán medidos se muestran en la Tabla 14.

**Tabla 14. Parámetros de entrada, variables de salida y sus unidades de medida**

Parámetro/Variable	Entrada (Eje X)	Salida (Eje Y)	Unidades
Número de clientes	X		Escalar (1, 2, ...n)
Radio de cobertura	X		Metros
<b>Tipo de tráfico:</b>	X		Tamaño de la muestra de voz: bytes.
<i>Códec</i> de voz utilizado <sup>33</sup>			
Datos			
Espaciamiento entre canales	X		Escalar: 1ch, 2ch, 3ch,...
Tiempo de simulación <sup>34</sup>	X		Segundos
<i>Throughput</i>		X	bps
Retardo		X	Microsegundos
Pérdida de paquetes		X	Escalar (1, 2, ...n): de acuerdo al número de paquetes enviados

Uno de los aspectos más importantes en el momento de analizar datos es elegir la forma en que éstos serán organizados. Entre las posibles opciones se encuentran diagramas circulares, de barras, histogramas, entre otros, pero debido a que el comportamiento de las variables de salida tiende a seguir un patrón lineal por tramos, ya sea creciente o decreciente la mejor elección está dada mediante la representación de los datos obtenidos a través de gráficas lineales que permitan visualizar con detalle el comportamiento de la variable a analizar en algún instante de tiempo acorde con los parámetros de entrada mencionados previamente. Aunque la generación de gráficas es una característica del simulador, ésta se limita a representar la variación de un parámetro en particular con respecto al tiempo por lo que es necesario representar el comportamiento de las variables de salida cuando se varía el resto de parámetros de entrada. Esto se logra mediante la ejecución de pruebas por separado, bajo las mismas características de simulación pero con la variación de un parámetro de entrada en particular. Posteriormente se procede a reunir los resultados de todas las pruebas realizadas y debido a que se realizaron bajo las mismas condiciones de simulación se hace posible la condensación de todos los datos en una misma gráfica.

Sin embargo, si se ejecutan tales pruebas sin tener en cuenta un conjunto de marcos de referencia se puede caer en el error de obtener un gran número de datos asociados a unos supuestos escenarios de aplicación convirtiendo el análisis de estos en un verdadero

<sup>33</sup> Las características de los *códecs* se vieron en detalle en el capítulo 2.

<sup>34</sup> Este parámetro es el configurado por defecto en el simulador. Sólo será utilizado en un escenario en particular.

problema. Para evitar esto, se definen dos escenarios con tráfico de voz, el primero está relacionado con el comportamiento de ciertas variables a nivel de una celda y el segundo tiene la función de ilustrar el desempeño de la red en condiciones multicelda. En especial el segundo escenario consta de sub-escenarios que se explicarán más adelante. Adicionalmente, se incluye un tercer escenario en el cual se analiza la transmisión de voz y datos de manera simultánea a nivel de una celda.

#### 5.4.4.1 Escenario 1: Análisis a nivel de una celda

Como ya es conocido, una celda es el elemento constitutivo de un *cluster*, por lo tanto las características de una celda sirven como base para la formación de un grupo de celdas con características similares, de tal manera que un análisis de las variables de salida (*throughput*, *delay*, pérdida de paquetes) a nivel de una celda permiten escoger el mejor valor del parámetro de entrada que se adapte a una situación requerida (por ejemplo, que la pérdida de paquetes sea inferior al 3% de paquetes transmitidos).

Por lo tanto, las características de la celda que se convierten en parámetros de entrada son: el radio de cobertura y el tipo de *códec* utilizado.

**Descripción:** este es el escenario más básico y está compuesto por una celda cuyo AP tiene un patrón de radiación de 360°. El AP se conecta a un *switch*<sup>35</sup> el cual tiene en uno de sus puertos un computador tipo *desktop* simulando de esta manera una LAN. Sólo se trabaja sobre una estación cliente 802.11e (QSTA) la cual recibe el tráfico generado por el computador de la LAN y está situada en el borde del área de cobertura. En cuanto a la generación de tráfico<sup>36</sup>, se hace uso de dos tipos de *códecs* para los cuales el tamaño de la carga útil varía desde un tamaño muy pequeño (10bytes G.729), y en donde también se considera un *códec* con una carga útil grande (160 bytes G. 711). Es decir, el equipo genera una CBR de acuerdo al *códec* seleccionado.

Tareas a realizar:

1. Analizar el comportamiento de las variables de salida al variar el radio de cobertura y el tipo de *códec* utilizado.
2. A partir del anterior análisis determinar cual es el mejor radio de cobertura, así como especificar que *códec* posee un mejor desempeño a nivel de celda. Esta escogencia servirá como base para el resto de escenarios.
3. Finalmente se concluye con el análisis de las variables de salida al modificar el número de estaciones transmisoras a nivel de celda y sector para posteriormente escoger el número de clientes que cada AP está en capacidad de soportar.

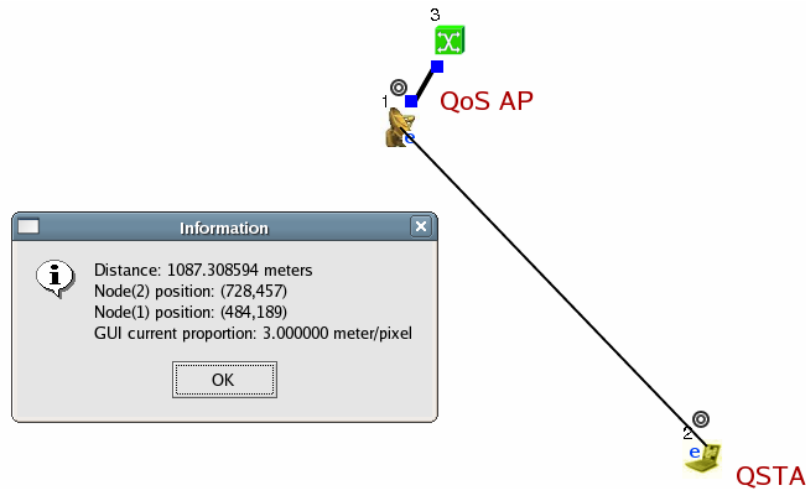
#### Representación gráfica.

El escenario propuesto se puede observar de mejor manera en la Figura 31.

---

<sup>35</sup> Configuración básica requerida por la herramienta de simulación.

<sup>36</sup> Los mecanismos de generación de tráfico se encuentran explicados en los Anexos B y C.



**Figura 31. Obtención del radio de cobertura adecuado a través de la herramienta de simulación NCTUns.**

#### **5.4.4.2 Escenario 2: Análisis a nivel multicelda**

Uno de los elementos diferenciadores de este trabajo consiste en analizar el desempeño de 802.11e en múltiples celdas. Para llevar a cabo esta tarea se necesita realizar un esquema de pruebas incremental que parte de un análisis a nivel de una celda hasta el análisis a nivel de múltiples celdas y como se vio en la sección anterior el análisis a nivel de una celda ya fue realizado por lo que aún resta analizar otras alternativas dando origen así a tres sub-escenarios de estudio que sólo difieren en el número de celdas de trabajo.

##### ***Sub-escenario 1: Análisis en 2 celdas***

**Descripción:** Este escenario está compuesto por dos celdas cuyo radio y *códec* de voz son tomados del análisis realizado a nivel de 1 celda. Se considera este sub-escenario de especial importancia debido a que en este punto es crucial conocer el efecto de las frecuencias de celdas interferentes sobre una estación que se encuentre ubicada en el borde de dos celdas adyacentes.

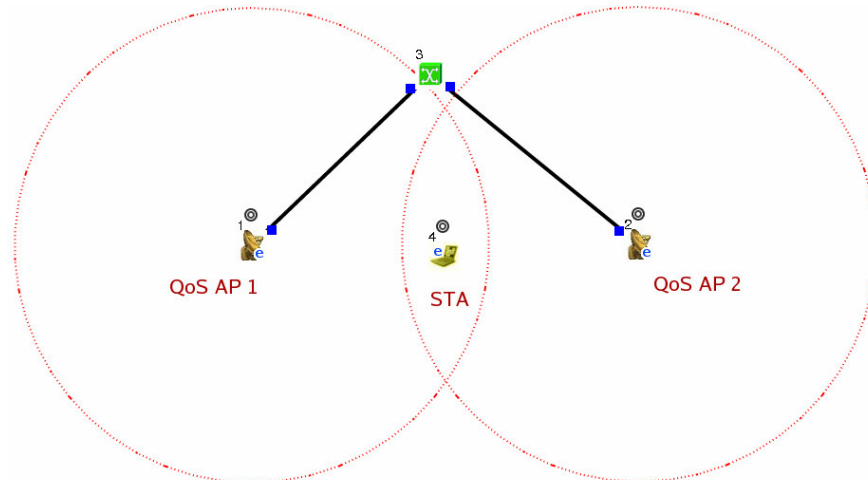
En este escenario existen dos AP cuyas zonas de cobertura son adyacentes y cuyo patrón de radiación es omnidireccional. A continuación se procede a ubicar una QSTA receptora en el borde del rango de cobertura. Las variables a considerar son las de salida, definidas previamente.

Tareas a realizar:

1. Analizar el comportamiento de las variables de salida al modificar la frecuencia de trabajo de los puntos de acceso de celdas diferentes.
2. Determinar cual es el mínimo número de canales (espaciamiento) requerido para conservar un nivel aceptable de QoS.
3. Decidir si el radio de cobertura propuesto en el primer análisis requerido es la mejor elección.

## Representación gráfica

En la Figura 32 se encuentra la representación gráfica de la descripción propuesta para este escenario.



**Figura 32. Ubicación de la estación cliente en zona de interferencia**

En este punto de la simulación se está en la capacidad de establecer cuales son los parámetros de entrada que serán utilizados como valores constantes de aquí en adelante. Estos son: radio de cobertura de celda (R), *códec* de voz y mínimo espaciado entre canales.

Una vez aclarado esto se procede con la definición de los escenarios restantes haciendo énfasis en el efecto de la variación de número de clientes por punto de acceso.

### **Sub-escenario 2: Análisis en un cluster con $K=3$**

**Descripción:** el propósito de este escenario es evaluar el efecto que tiene el incremento del número de estaciones a nivel de un *cluster*. En esta etapa se considera la división de cada celda en tres sectores y la transmisión de datos se realiza entre estaciones pertenecientes a celdas diferentes del mismo *cluster*.

Tareas a realizar:

1. Analizar las variables de salida al variar el número de estaciones clientes.
2. A partir del análisis anterior deducir el número de estaciones que una celda y todo el *cluster* está en capacidad de soportar proporcionando un nivel del QoS aceptable.

Su implementación sobre la herramienta de simulación se basa en el diagrama de red propuesto al final del capítulo cuatro.

#### **5.4.4.3 Escenario 3: Análisis a nivel de una celda con tráfico de voz y datos**

**Descripción:** Este escenario se compone de una celda con usuarios de voz y datos sobre la cual las llamadas en curso se realizan entre estaciones pertenecientes a la misma celda mientras que la transmisión de datos se realiza entre una estación que se encuentra



dentro del rango de cobertura del AP y una estación en una red LAN, esto con el fin de simular una conexión a Internet.

Tareas a realizar:

1. Analizar el comportamiento de las variables de salida frente a la variación del número de estaciones con tráfico de datos con el propósito de determinar el número de estaciones de voz adecuado.
2. Analizar el efecto del número de estaciones de voz previamente encontrado sobre el tráfico de datos.
3. Determinar un factor que relacione el número de estaciones de voz y datos que un AP está en capacidad de soportar de tal manera que se garantice una QoS simultánea sobre las aplicaciones de voz y datos.

### Representación gráfica

En la Figura 33 se encuentra la representación gráfica de la descripción propuesta para este escenario.

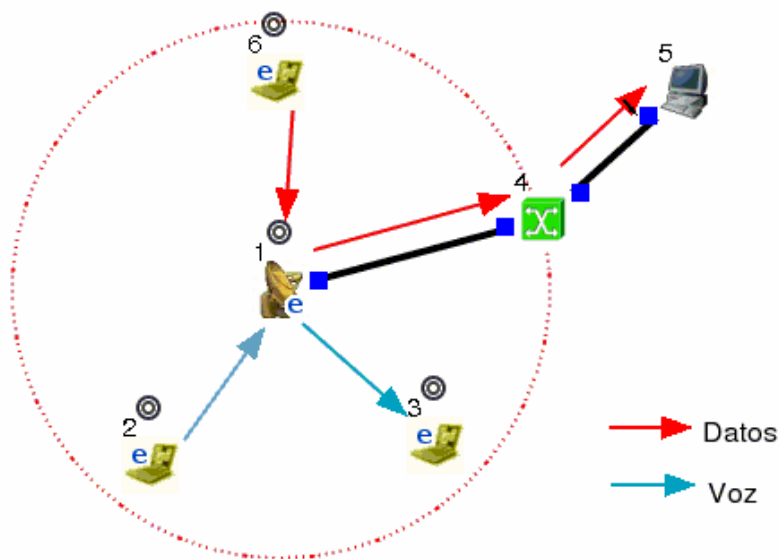


Figura 33. Representación de la transmisión de voz y datos sobre una celda.

## 5.4.5 Experimentación con el Modelo de Simulación

Esta fase se compone de un análisis de los resultados obtenidos según los escenarios propuestos. Esto se muestra a continuación.

### 5.4.5.1 Análisis de Resultados

Entre las tareas implícitas en la implementación de una metodología de simulación se encuentra comprender muy bien los datos arrojados por el simulador y la forma en la que éste realiza los cálculos. Como se mencionó anteriormente los parámetros a ser

evaluados son el *throughput*, el retardo y la pérdida de paquetes lo que conlleva a clarificar los siguientes aspectos:

- El cálculo del *throughput* se realiza en cada estación receptora y teniendo en cuenta las características del simulador esta variable es obtenido a partir del conteo del número de KBps que la estación destino recibe. Para una mejor visualización en las gráficas, esta variable será expresada en bps.
- El retardo se obtiene a partir de las diferencias de marcas de tiempo a nivel IP, es decir, el retardo que calcula el simulador contabiliza el tiempo desde que el paquete ingresa al nivel IP de la estación trasmisora, hasta el momento en que este es leído en la estación receptora. Por lo tanto el cálculo no considera el retardo debido al proceso de codificación y decodificación (niveles superiores al IP).

Además, con el fin de hacer uso de las recomendaciones de QoS los análisis realizados se basarán en la recomendación ITU-T G.1010 la cual sugiere unos valores de desempeño de referencia en donde la pérdida de paquetes debe ser inferior al 3 % del total de los paquetes transmitidos y se establece que el retardo máximo permitido en un solo sentido es de 150 *ms*. Una vez entendido esto se procede con el análisis de resultados.

### **Escenario Número 1: Análisis a nivel de una celda**

En este escenario se analizaron los *códecs*:

G.729: tamaño muestra (10ms, 10 bytes, PPS=100), CBR (1KB/seg=8000bps)

G.711: tamaño muestra (20ms, 160 bytes, PPS=50), CBR (8KB/seg= 64000bps)

Y se varió el radio de cobertura en distancias de 200m.

### **Sub-escenario 1: Análisis sobre una celda con patrón omnidireccional**

A pesar de que la tecnología IEEE 802.11 cuenta con altas velocidades de transmisión de datos presenta una desventaja relacionada con su limitado rango de cobertura. Para sobrellevar esto, el estándar cuenta con una opción de DRS que permite ampliar la cobertura a unos metros adicionales a cambio de una variación abrupta en la velocidad de transmisión de datos, razón por la cual 802.11b posee cuatro velocidades de transmisión (11, 5.5, 2,1 Mbps) que se adaptan de acuerdo a las condiciones del medio (intensidad de la señal). Lo anterior está estrechamente relacionado con la variación del *throughput* el cual también disminuye y por lo tanto reduce la capacidad del sistema. Sin embargo, las Figuras 34 y 35 ilustran lo contrario ya que muestran como el *throughput* de la estación receptora, cuya posición se varió en distancias de 200m, se mantiene relativamente constante y presenta una disminución a partir de las distancias cercanas a 1 Km. Este comportamiento se puede abordar considerando dos aspectos, el primero está relacionado con la incapacidad del simulador de realizar un cambio automático de velocidad de transmisión por lo que debe realizarse manualmente y el segundo, el simulador sólo registra la variación del *throughput* para la velocidad de transmisión escogida, en este caso 11 Mbps. Por lo tanto, debido a limitaciones del simulador se decidió trabajar con un radio de cobertura de 1 Km.

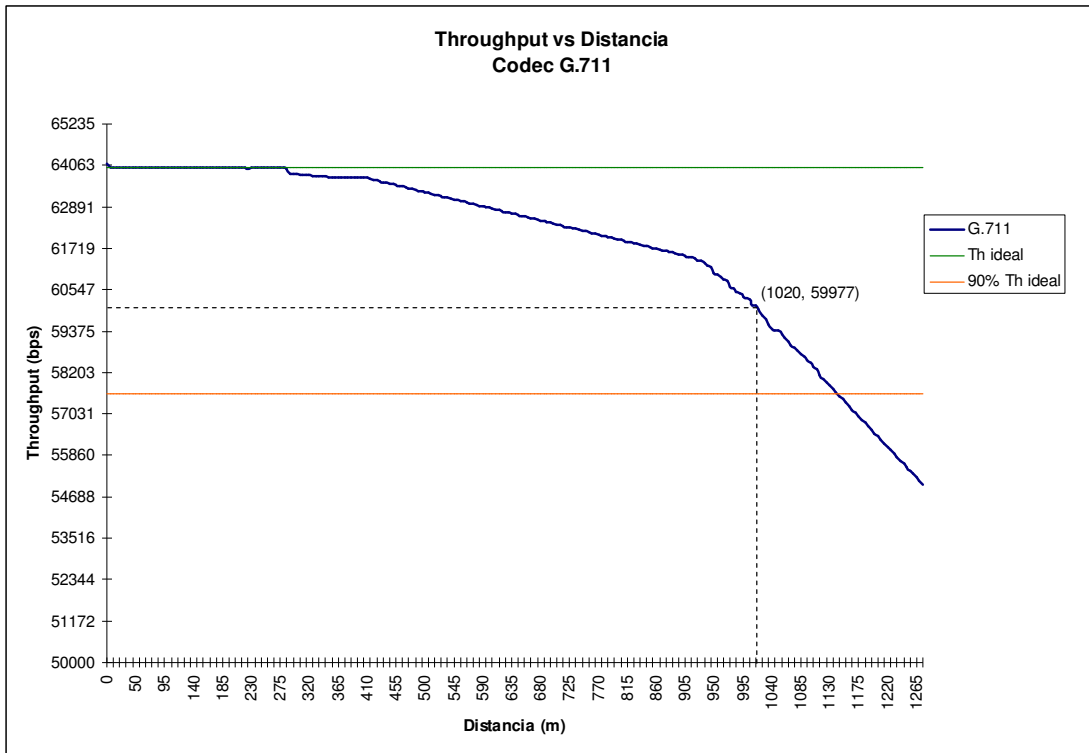


Figura 34. *Throughput* vs. Distancia. Código G.711.

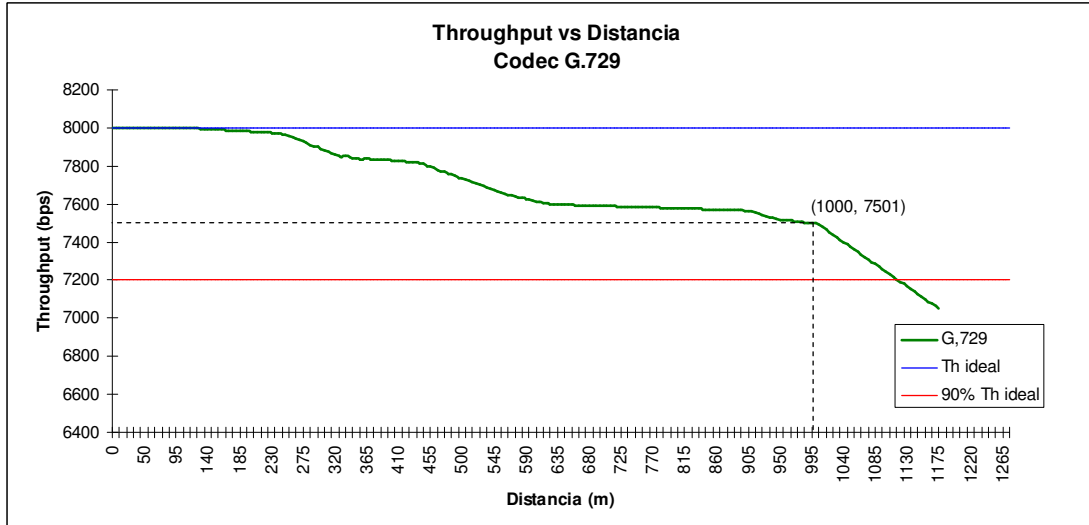


Figura 35. *Throughput* vs. Distancia. Código G.729.

Por otro lado, la Figura 36 muestra el *throughput* medido de una llamada de 8 KB/seg (64Kbps) a medida que se varía el número de estaciones. Aquí se puede observar que cuando el número de estaciones supera a 18, el valor del *throughput* cae por debajo de los 60Kbps. Este comportamiento está relacionado con la disminución de la probabilidad de acceso al medio ya que el número de estaciones aumenta, es decir, la contienda por el medio se torna más difícil y los paquetes que se encuentran listos para ser transmitidos (en la cola de la categoría de acceso 6, AC[6]) deben esperar hasta que la estación gane el acceso al medio. Este retardo hace que la tasa CONSTANTE de bits (CBR) generada por el *código* (64Kbps) sea diferente de la que la estación en realidad transmite

(VARIABLE), en otras palabras, si no existiera contienda por el medio, el número de paquetes por segundo que saldrían del nivel MAC (que se transmiten) serían 50, pero al existir un retardo adicional (tiempo de *backoff*, AIFS, conteo del NAV), el número de paquetes transmitidos disminuye. Esto se ve reflejado en la Figura 37, en donde se observa que el retardo se mantiene relativamente constante cuando el número de estaciones es bajo, pero este comienza a aumentar a medida que la cantidad de usuarios incrementa. Nótese que a pesar de que este parámetro presenta un comportamiento lineal creciente, la variación es muy lenta y los valores del retardo son muy bajos, del orden de los 5 ms como máximo. Estos valores tan pequeños llevan a pensar que si se desea proporcionar una QoS extremo a extremo, de tal manera que el retardo en un solo sentido sea inferior a 150 ms, el retardo obtenido en la Figura 37 se puede considerar muy bajo, pero su efecto a nivel MAC es muy profundo y se ve reflejado en el *throughput* de la estación cliente.

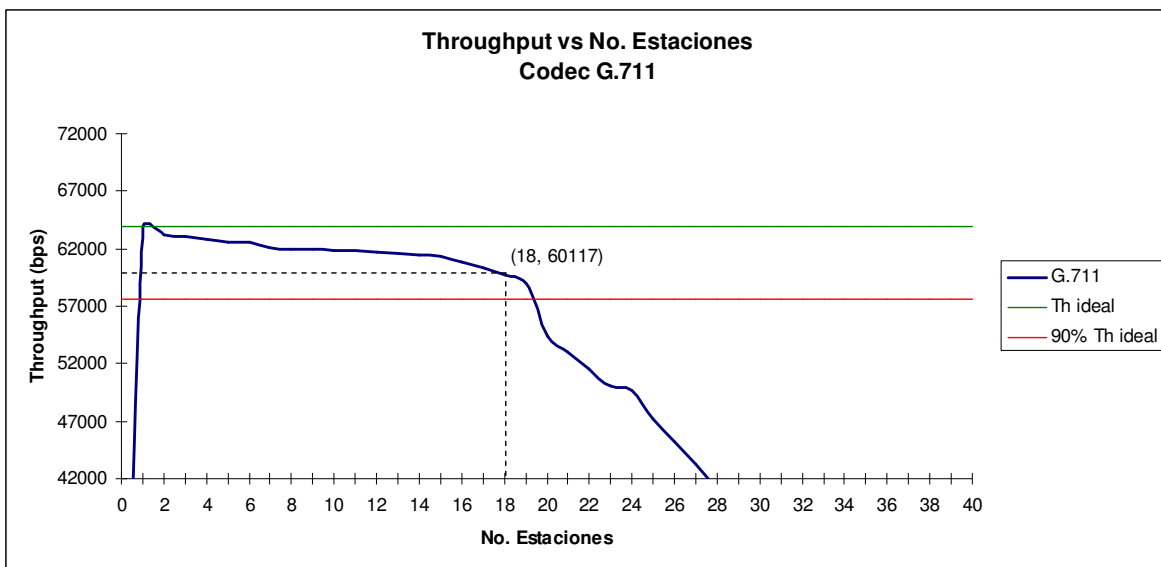


Figura 36. *Throughput* vs. No. Estaciones haciendo uso del códec G.711

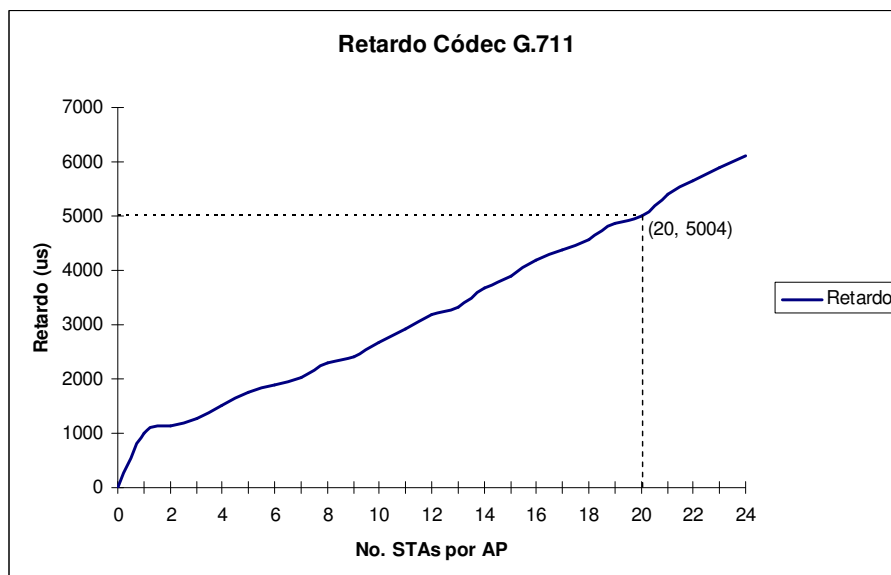
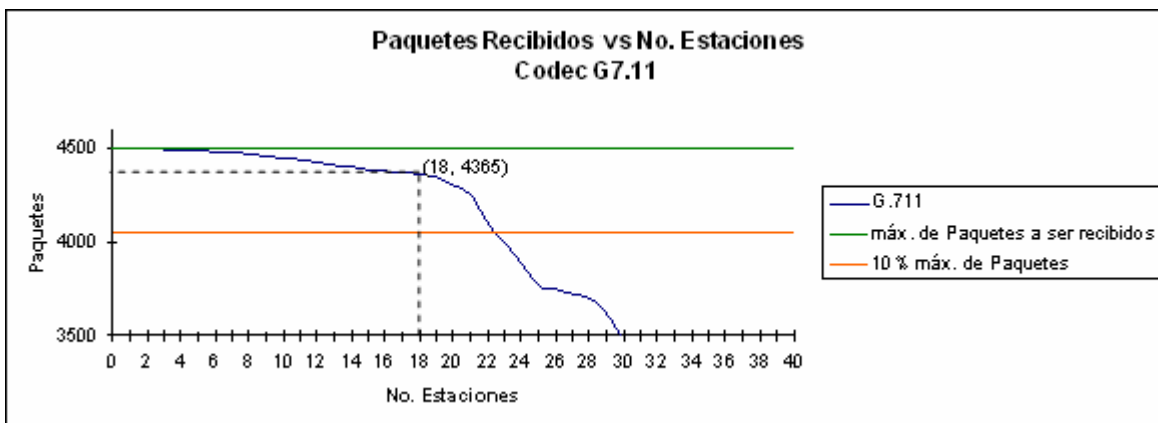


Figura 37. Retardo vs. No. Estaciones. Códec G.711.

Sin embargo, no se ha mencionado por qué se tomó el valor de 60Kbps como referencia. Este se obtiene a partir de la Figura 38, en donde se observa como a partir de 4500 paquetes transmitidos durante el período de simulación el número de paquetes que llegan al receptor varía, empezando desde 4500 (dos estaciones transmitiendo) hasta llegar a valores cercanos a los 4000 paquetes recibidos. De acuerdo a la recomendación G.1010 la pérdida debe ser inferior al 3 % de los paquetes transmitidos, es decir, para un tiempo de simulación de 90 segundos, el máximo número de paquetes perdidos que se puede considerar es de  $4900 \times 3\% = 147$  o dicho de otra manera, durante cada segundo se puede perder únicamente el tres por ciento del número de paquetes transmitidos, esto es  $50 \times 3\% = 1.6$  paquetes. Por lo tanto, el número de paquetes que se recibiría por segundo es de 49 y el *throughput* registrado en el destino sería de  $49 \times 160 \text{ bytes/seg} = 7840 \text{ Bps} = 62720 \text{ bps}$ . No obstante, se considera que este es un valor de referencia muy alto puesto que según el análisis hecho previamente, sólo se perdería un paquete por segundo y este valor es lo suficientemente bajo por lo que la inteligibilidad de la conversación [41] no se ve afectada. Por otro lado, se encontró en [42] que la caída de la mayor parte de las llamadas VoIP se da cuando el *throughput* cae por debajo del 10% de su valor ideal y aplicando esta consideración al escenario de simulación propuesto se obtiene un *throughput* mínimo de  $64 \text{ Kbps} - 6400 \text{ bps} = 57600 \text{ bps}$ , por lo que si se considera un margen de diferencia<sup>37</sup> de 2400 bps se tiene que el *throughput* de referencia es de  $57600 \text{ bps} + 2400 \text{ bps} = 60000 \text{ bps} = 60 \text{ Kbps}$ .

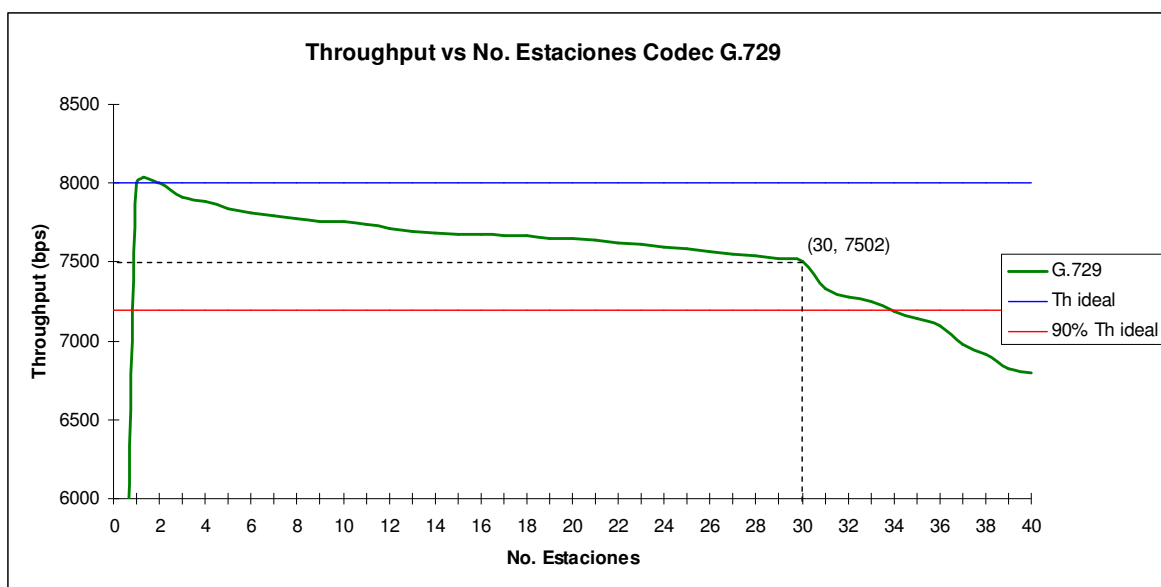


**Figura 38. Paquetes Recibidos vs. No. Estaciones haciendo uso del códec G.711.**

Un análisis similar se obtiene para el códec G.729 en donde se observa que la diferencia en los niveles de *throughput* es notable debido a que el tamaño de la carga útil es muy bajo comparado con el de G.711. Sin embargo, el comportamiento de esta variable, indicado en la Figura 39, demuestra que su variación es más lenta a medida que aumenta el número de estaciones. Para explicar este hecho es necesario retomar lo explicado en el capítulo 2 en donde se menciona al Vector de Asignación de Red (NAV) cuya función principal es la de notificar a su estación que el medio se encuentra virtualmente libre una vez este contador se haya actualizado y decrementado, de acuerdo a la información obtenida del campo *Duration* de la trama MAC. Este campo es mapeado por la estación que gana el acceso al medio y contiene el tiempo de transmisión estimado de acuerdo al TAMAÑO del paquete de datos que está ingresando a la capa MAC (expresión 8 capítulo 2 sección 2.3.1). A partir de lo anterior, es fácil deducir que, puesto que el tamaño de las

<sup>37</sup> Debido a que la fluctuación en el número de paquetes perdidos es variable, es deseable establecer un cierto margen de error cuyo valor mínimo sea equivalente al 90% del valor de *throughput* ideal. En este caso se considera un margen de diferencia aproximado de 0.3KBbps.

muestras de este *códec* es menor que el del G.711, el tiempo de transmisión será menor y el valor del campo *Duration* será más bajo así como el valor del NAV del resto de estaciones. Todo esto se ve reflejado en la disminución del tiempo de espera, en el incremento de la probabilidad de acceso al medio y en la posibilidad de transmitir los paquetes a la misma velocidad de generación de bits del *códec*, es decir, se reduce la probabilidad de que se pierdan paquetes y se puede mantener un nivel de *throughput* relativamente constante. De manera más sencilla, lo anterior demuestra como el bajo ancho de banda consumido por este *códec* influye sobre la capacidad del sistema. Sin embargo, a pesar de contar con tiempos del NAV muy bajos, en la misma Figura 39 se puede observar cómo a medida que el número de estaciones que transmiten se acerca a 30 el valor del *throughput* comienza a decrecer. En este caso el número de estaciones juega un papel importante ya que la competencia por el medio es cada vez más difícil y por lo tanto el retardo es cada vez mayor.



**Figura 39. Throughput vs. No Estaciones con el *códec* G.729.**

Para el caso de la Figura 40 se observa que los valores de retardo son más bajos, debido a lo mencionado en el párrafo anterior y su valor comienza a exceder los 4 ms cuando el número de estaciones se acerca a 28. Siguiendo el mismo análisis, en la Figura 41 se tiene que a medida que el número de estaciones aumenta el número de paquetes que llegan al destino disminuye.

Finalmente se concluye que a nivel de una celda, cuyo AP tiene un patrón omnidireccional, un adecuado radio de cobertura se da cuando este es inferior a 1 Km bajo el cual la capacidad de la celda se ve afectada según el tipo de *códec* utilizado presentando el *códec* G.729 un mejor desempeño debido al bajo consumo de ancho de banda. De la misma manera, se dedujo la importancia del efecto de los retardos a nivel MAC a medida que se aumenta el número de estaciones y como estos tres parámetros están estrechamente relacionados.

Con el propósito de presentar uniformidad en los datos en todos los escenarios se trabajará de aquí en adelante bajo el supuesto de un radio de cobertura de 1 Km y el *códec* G.711<sup>38</sup>.

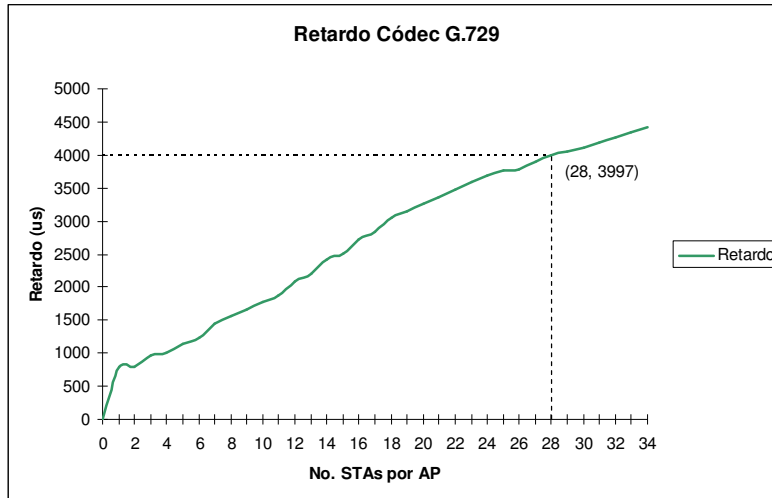


Figura 40. Retardo vs. Incremento en el número de estaciones. *Códec* G.729.

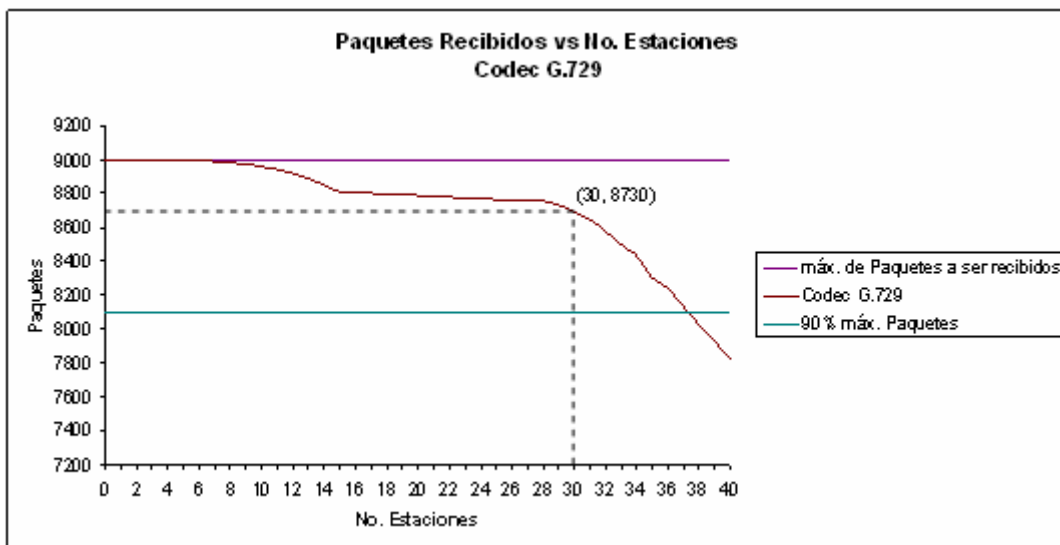


Figura 41. Paquetes Recibidos vs. Número de estaciones. *Códec* G.729.

### Sub-escenario 2: Análisis a nivel de una celda sectorizada

Hasta este momento se han considerado el comportamiento de las variables elegidas en APs con radiación omnidireccional. A continuación se realizará un análisis de las variables más relevantes considerando la sectorización de las celdas.

Tal como se muestra en la Figura 42, el *throughput* no registra un cambio considerable cuando se hace uso de un *switch*. Se puede observar que el número de estaciones por

<sup>38</sup> Se decidió escoger el *códec* G. 711 debido a su baja complejidad, menor consumo de potencia y notable presencia en los actuales teléfonos Wi-Fi, además, la herramienta y el equipo de simulación no presentan estabilidad a medida que se aumenta el número de estaciones al hacer uso del *códec* G.729 conllevando repetidas veces al reinicio del sistema.

AP se mantiene y el retardo no presenta mayor variación. El hecho de agregar un *switch* por celda no influye significativamente en ninguna de las variables de consideración debido principalmente a que el tráfico generado es muy bajo como para ocasionar un problema a nivel de colas y puertos en el *switch*. Esto es, una vez la estación haya ganado el acceso al medio, esta ha “reservado” el canal por un instante de tiempo y la variación del *throughput*, retardo y pérdida de paquetes es ahora función de las características propias del *switch* (tiempo de procesamiento, disciplinas de servicio y esquemas de gestión de *buffer*). Para este caso, a pesar de obtener resultados con un *switch* con características que no permiten el soporte de QoS (del tipo Entra Primero Sale Primero (*First In First Out*, FIFO), *Tail Drop*) estas son suficientes para satisfacer el número de paquetes que el *switch* recibe en un instante de tiempo, viéndose reflejado en la baja cantidad de paquetes perdidos (ver Figura 43). De esta manera se deduce como el retardo a nivel de una celda y particularmente a nivel de sector (ver Figura 44) se debe principalmente al retardo debido a la contienda por el medio.

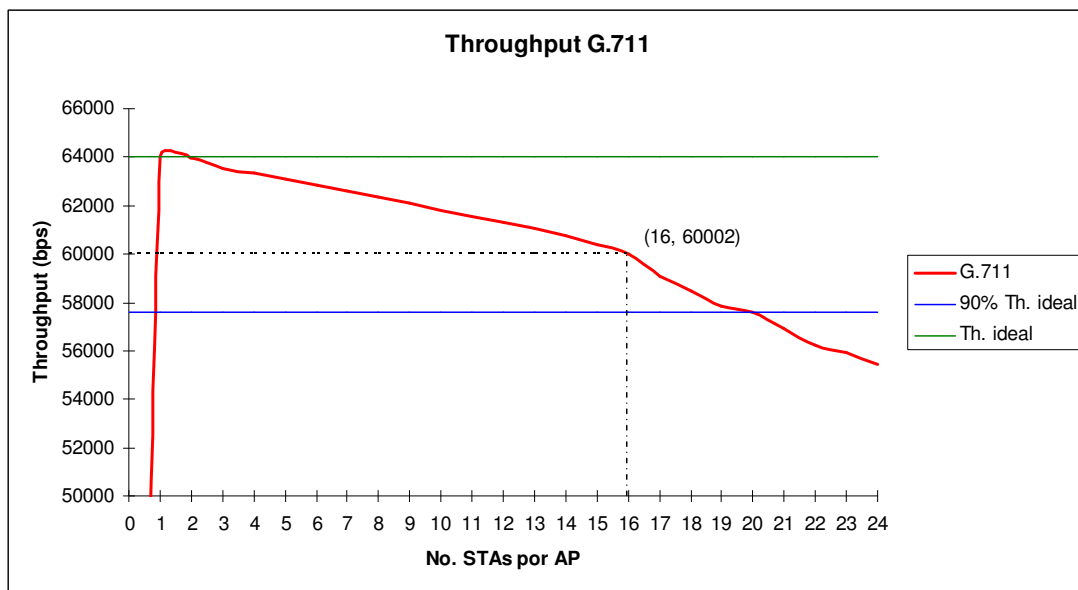


Figura 42. *Throughput* vs. Número de estaciones en una celda sectorizada.

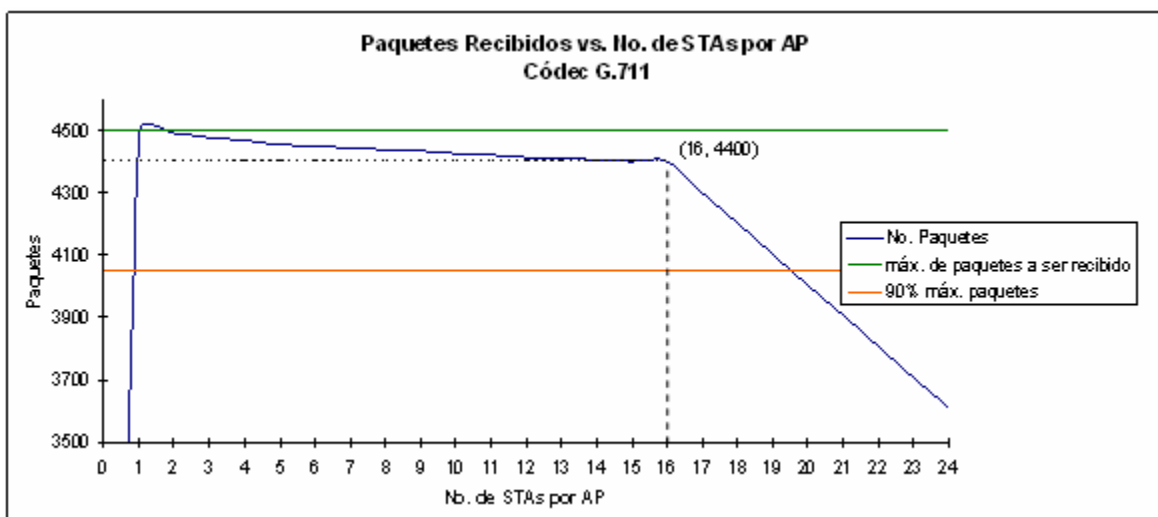


Figura 43. Paquetes Recibidos vs. Número de estaciones en una celda sectorizada.



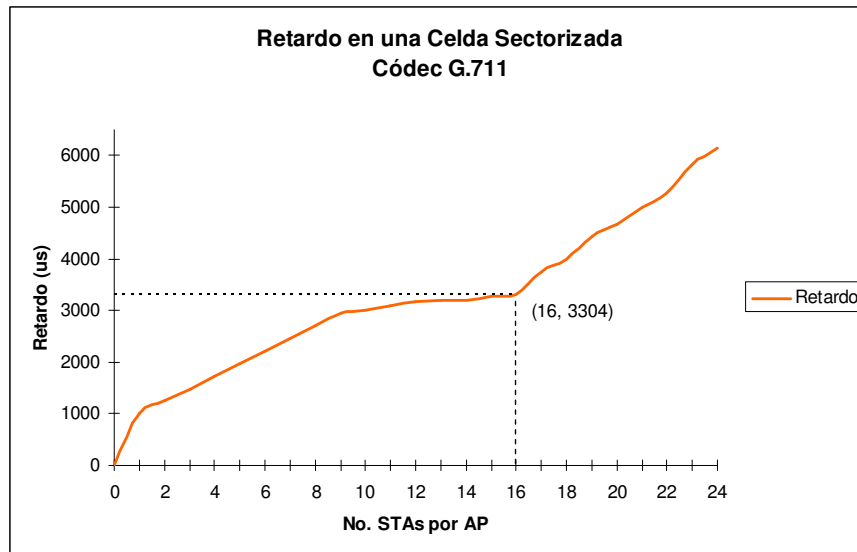


Figura 44. Retardo vs. Número de estaciones en una celda sectorizada.

## Escenario 2: Análisis a nivel multicelda

### Sub-escenario 1: Análisis en 2 celdas

En la Figura 45 se muestra como varía el *throughput* a medida que se modifica la frecuencia de trabajo de la celda adyacente<sup>39</sup>. Es de especial importancia considerar el hecho de que a pesar de contar con la máxima separación posible de 6 canales establecida por 802.11b, el nivel del *throughput* se ve afectado. Dado que sólo existe una estación que recibe tráfico se descarta la posibilidad de que se presenten retardos debido a la competencia por el medio o al tiempo de transmisión del paquete; la única opción que resta es una posible interferencia de una fuente externa. Partiendo del hecho de que un mal funcionamiento a nivel físico se refleja en un bajo desempeño a nivel MAC, se deduce que existe algo a nivel PHY que no funciona correctamente, para lo que se utilizaron canales superiores (7, 8, 9) y se observó que en esta ocasión el nivel de *throughput* se mantuvo en un nivel constante. Lo anterior lleva a pensar que la interferencia sobre la(s) estación(es) que se encuentran en el borde de la celda cobertura se reduce si se utiliza una separación entre canales superior a los 6 canales propuestos, además de elegir una potencia de transmisión apropiada tal como se menciona en [43].

Este resultado es un ejemplo de lo propuesto en el capítulo 3 en donde se mencionó la importancia de trabajar bajo un estándar cuya separación entre canales sea lo suficientemente amplia, esto con propósitos de capacidad y reducción de interferencia. Tal estándar es el IEEE 802.11a, que hace uso de un espaciamiento de 8 canales.

En la Figura 46 se muestra como el retardo se mantiene en un nivel muy bajo dada la ausencia de estaciones que contiendan por el medio. Para el caso de la pérdida de paquetes, en la Figura 47, se puede observar como existe una variación drástica a partir de los 40 segundos cuando el AP de la celda adyacente opera sobre el mismo canal. En cambio a medida que se hace mayor el espaciamiento entre canales, el número de paquetes perdidos disminuye de acuerdo con lo explicado anteriormente.

<sup>39</sup> El primer AP está en el canal 1 mientras que el segundo AP se activó luego de haber transcurrido 40 segundos de la simulación y se varió su canal.

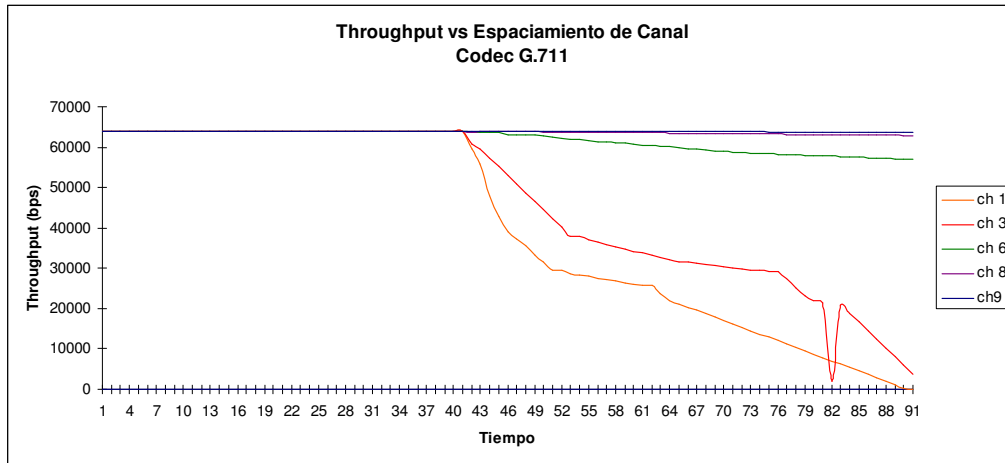


Figura 45. Throughput vs. Espaciamento de canal de celda adyacente

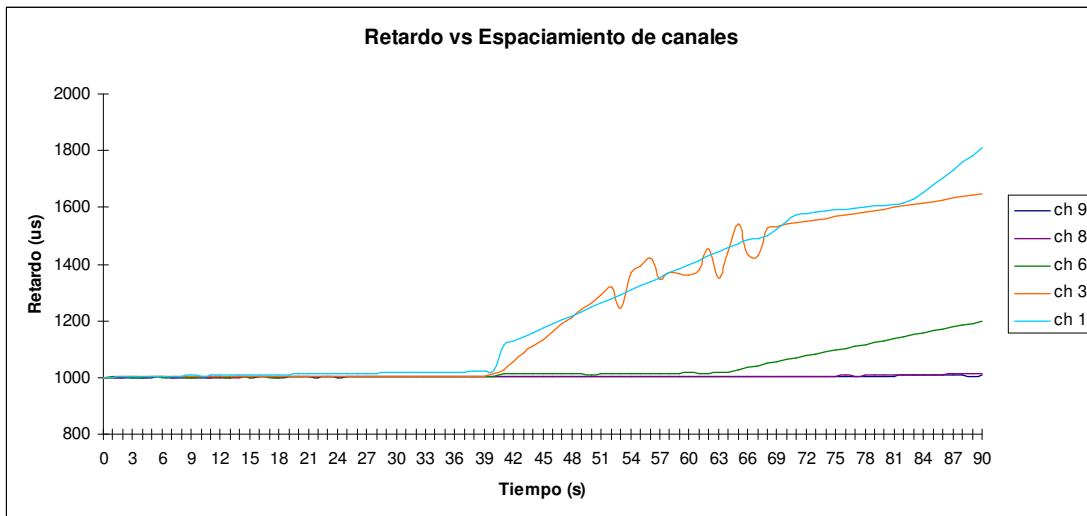


Figura 46. Comportamiento del retardo al variar el canal de la celda adyacente.

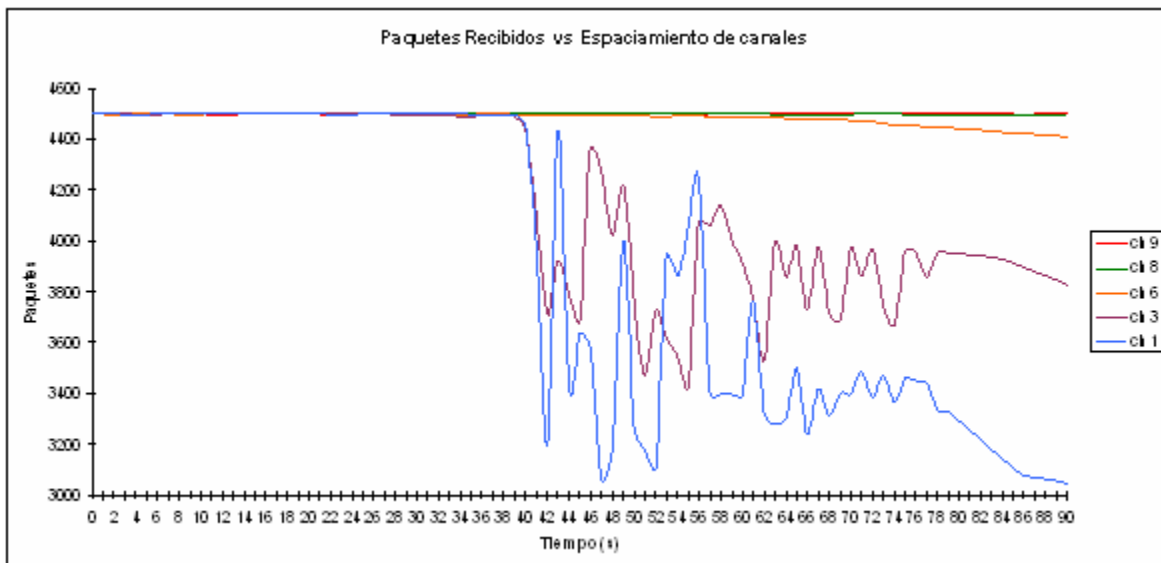


Figura 47. Variación en los paquetes recibidos vs. Variación del Canal Adyacente.

Por lo tanto, de este escenario se deduce que la mejor elección de frecuencias se da cuando existe un espaciamiento entre canales superior a 6 siendo la tecnología 802.11a la que mejor se adapta a esta situación.

### Sub-escenario 2: Análisis en un *cluster* con K= 3

De acuerdo a la Figura 48, se observa un retardo adicional debido al aumento del número de saltos (3 *switches*) que el paquete de voz debe atravesar. En el anterior escenario se obtuvo que el retardo introducido por un *switch* a nivel de celda era mínimo y, en este caso, el retardo sigue teniendo un valor bajo, alcanzado tiempos de 5 ms como máximo. No obstante, en este escenario es elemental reconocer la importancia del *switch* que hace parte de la infraestructura del proveedor de red, ya que es el encargado de recibir todo el tráfico proveniente de cada una de las celdas que componen el *cluster*, lo cual puede ser causa de una aumento en el retardo y de la pérdida de QoS si se toma en consideración otro tipo de tráfico (video o datos). Por lo tanto aunque en este escenario sólo se considera tráfico de voz, es importante comprender que se requiere que los dispositivos de la infraestructura del proveedor de red cuenten con mecanismos que garanticen un nivel de QoS apropiado.

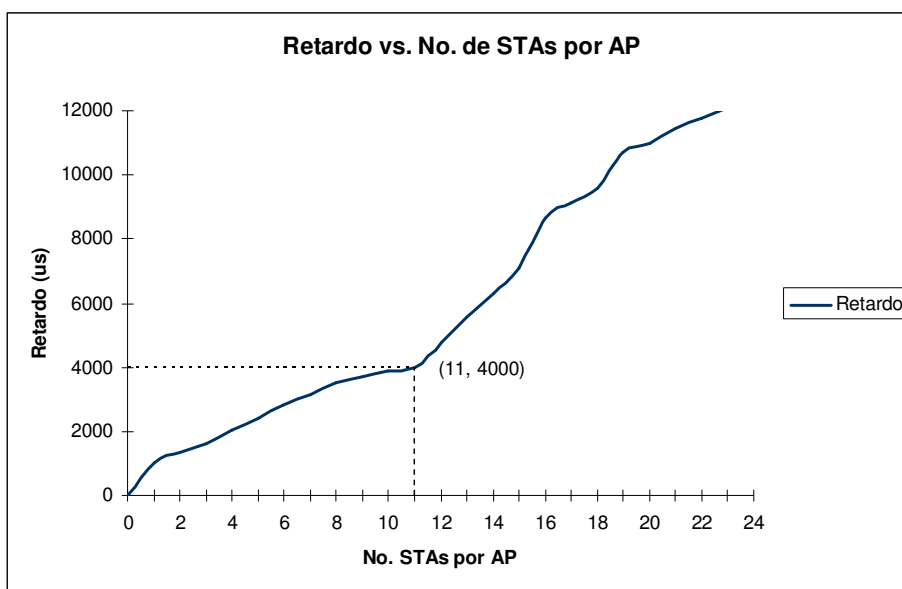


Figura 48. Retardo en un *cluster* con K=3.

En cuanto al comportamiento del *throughput* se puede observar en la Figura 49 una desmejora debido principalmente a la presencia de celdas vecinas cuya interferencia afecta en cierta medida el desempeño de la red, y su efecto se ve reflejado en la disminución del número de paquetes por segundo que llegan al receptor (ver Figura 50). En este caso el número estaciones de voz que cada AP está en capacidad de soportar se reduce aproximadamente a 11, manteniéndose por encima del *throughput* de referencia definido en el análisis en una celda omnidireccional.

De lo anterior se deduce que a medida que el número de celdas aumenta, la capacidad de cada AP se ve influenciada por el incremento en la congestión a nivel del *switch* que se encuentra en el proveedor de red. Para este caso, es importante hacer hincapié en los mecanismos de QoS que este nodo debe soportar, ya que en este escenario se ha

mostrado una disminución de la capacidad del sistema sin tener en cuenta un posible y probable caso de transporte de tráfico de datos o de video simultáneamente.

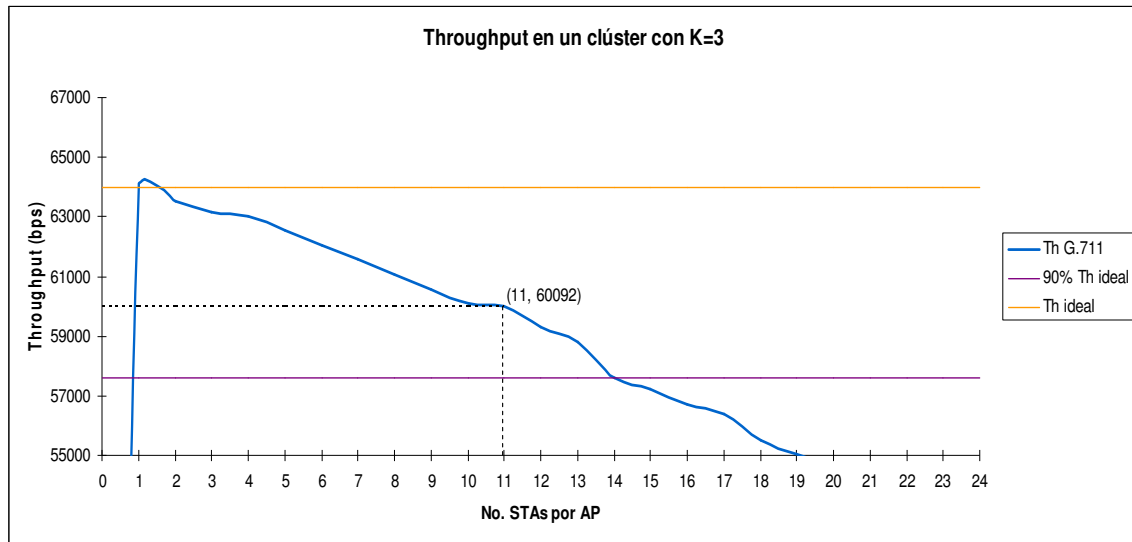


Figura 49. *Throughput* vs. Número de estaciones en un *cluster* con K=3.

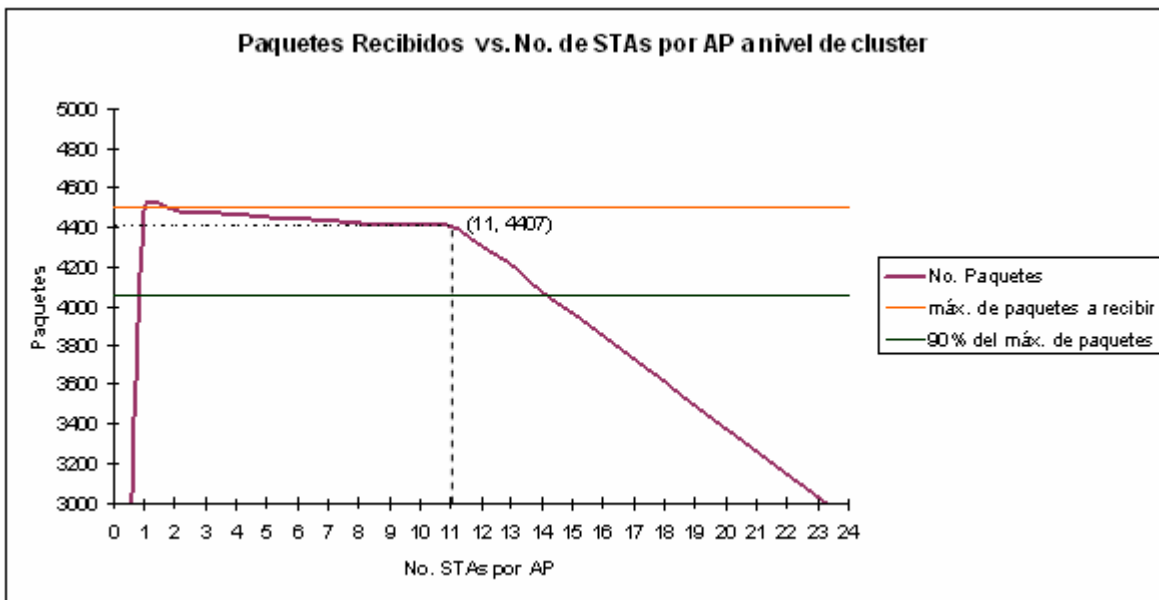


Figura 50. Paquetes Recibidos vs. Número de estaciones en un *cluster* con K=3.

### Escenario 3: Análisis a nivel de una celda con tráfico de voz y datos

Entre las características más notables del estándar 802.11e se encuentra la capacidad de proporcionar un tratamiento privilegiado a las aplicaciones como voz y video frente a las aplicaciones de datos. Como se mencionó en el capítulo 2, esto se consigue mediante la asignación un tiempo de espera adecuado (AIFS) que incrementa la posibilidad de acceso al medio inalámbrico de una manera más rápida retardando en cierta medida el acceso de

las estaciones con tráfico de datos. Esto se puede apreciar en la Figura 51 en donde se observa que el número de estaciones con tráfico de voz soportado por un AP se ve afectado levemente a medida que el número de estaciones de datos incrementa, llegando a un valor de 14 estaciones que registran un nivel de *throughput* aceptable (superior al 90% de su valor ideal). Sin embargo, cuando existen 4 estaciones con tráfico de datos<sup>40</sup> el *throughput* de las estaciones de voz comienza a deteriorarse lentamente puesto que el período de ocupación del medio por parte de una estación con AC[0] aumenta considerablemente al transmitir tramas de mayor tamaño (1500 bytes). Este efecto comienza a ser más notorio y perjudicial cuando se llega a un número de 7 estaciones con tráfico de datos por lo que las conversaciones en curso pueden finalizar inesperadamente generando así un mal funcionamiento del sistema. En cuanto al retardo, éste aumenta considerablemente alcanzando valores de 15 ms debido al aumento en el tamaño de las tramas de datos que transmiten las estaciones involucradas.

De igual manera, la pérdida de paquetes de voz se hace más notoria a medida que aumenta el número de estaciones de voz y datos por AP.

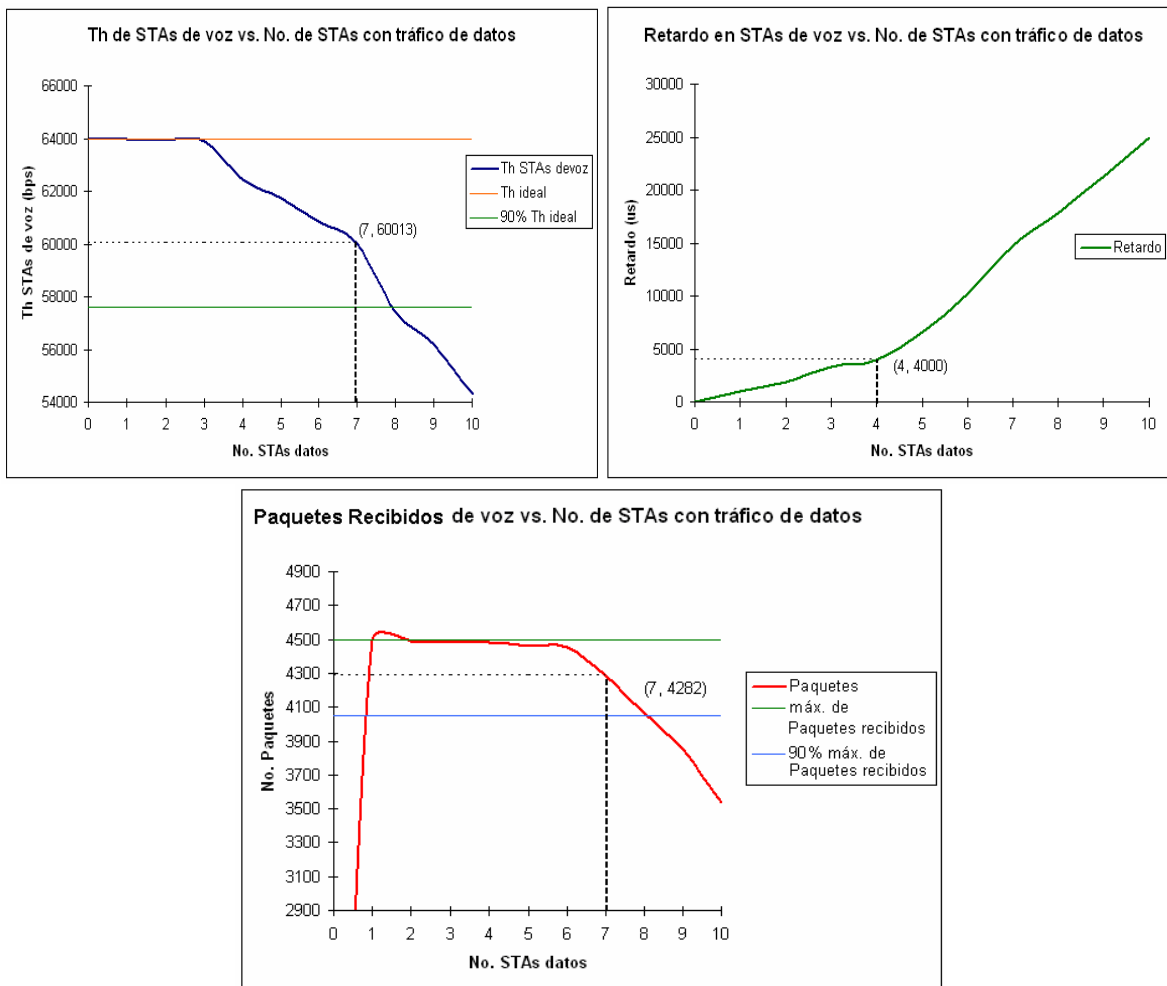
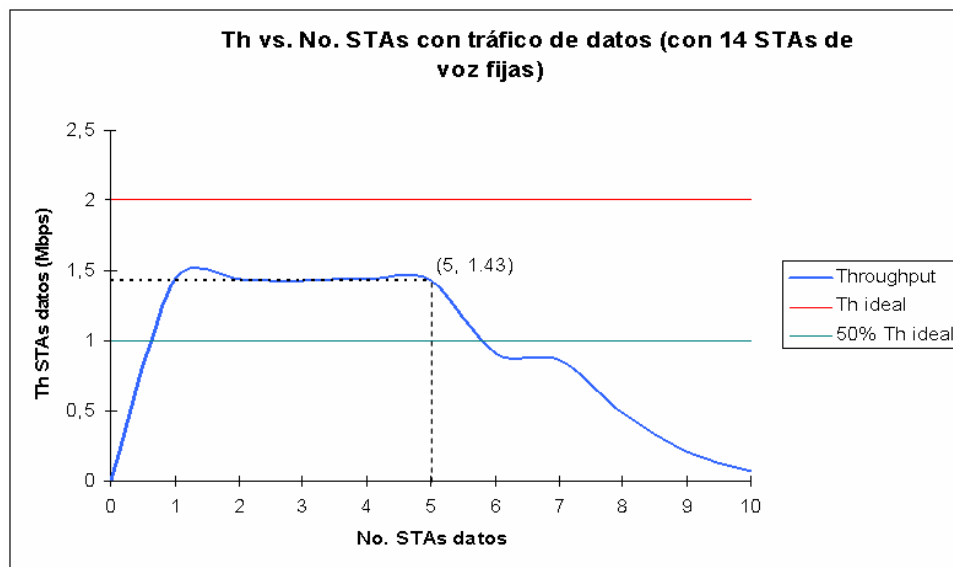


Figura 51. *Throughput*, retardo y paquetes recibidos

<sup>40</sup> El tráfico generado por la estación de datos es de 2Mbps, con un tamaño de trama de 1500 bytes.

Hasta este punto se ha obtenido que el número de estaciones de voz y datos que pueden coexistir en un mismo AP es 21: 14 de voz y 7 de datos. Sin embargo, no se ha estudiado el efecto de las 14 estaciones de voz sobre las variables de *throughput*, retardo y pérdida de paquetes de las estaciones con tráfico de datos. Tal efecto se ilustra en la Figura 52 en donde se observa que al existir 7 estaciones de datos, el valor del *throughput* alcanza valores muy bajos, inferiores al 50% de su valor ideal, lo cual se vería reflejado en la lentitud en la carga de una página *web* o en la descarga de un archivo de Internet, por ejemplo. No obstante, a medida que el número de estaciones de datos disminuye, el *throughput* presenta un comportamiento creciente estabilizándose en un valor del 70% cuando el número de estaciones es inferior a 5.



**Figura 52. Throughput vs. No. STAs con tráfico de datos (con 14 STAs de voz fijas)**

Lo anterior sugiere la posibilidad de disponer de 14 estaciones de voz junto con 5 estaciones con tráfico de datos, es decir se da lugar a un factor de  $5/14 \approx 0.3$  que garantiza una QoS extremo a extremo en cada AP asegurando niveles de *throughput*, retardo y pérdida de paquetes aceptables. Sin embargo, entre las limitaciones del simulador se mencionó la incapacidad de garantizar una QoS extremo debido a la presencia de dispositivos intermedios que carecen de mecanismos de diferenciación de tráfico por lo que la determinación del número de usuarios de voz y datos a nivel multicelda se limita al uso del factor anteriormente sugerido, la cantidad de usuarios de voz soportado por el AP y el número de APs requeridos. En el caso de un *cluster* con  $K=3$  se tiene:

Número de APs por *cluster*: 9

Cantidad de usuarios de voz soportado por AP: 11

Número de usuarios de voz por *cluster*:  $9 \times 11 = 99$

Número de usuarios de datos por *cluster*:  $9 \times 11 \times 0.3 \approx 29$

Número de usuarios con tráfico de voz y datos por *cluster*:  $99 + 29 \approx 128$

En cuanto a los valores de pérdida de paquetes y de retardo se observa un aumento considerable debido principalmente a la alta prioridad de acceso que tienen las aplicaciones de voz sobre las de datos (ver Figura 53 y 54 respectivamente).

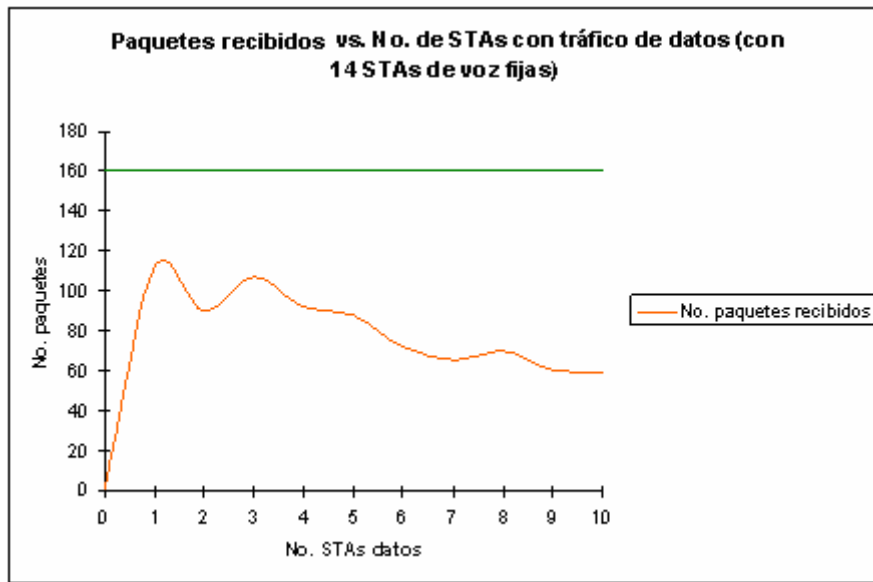


Figura 53. Paquetes Recibidos vs. No. de STAs con tráfico de datos (con 14 STAs de voz fijas)

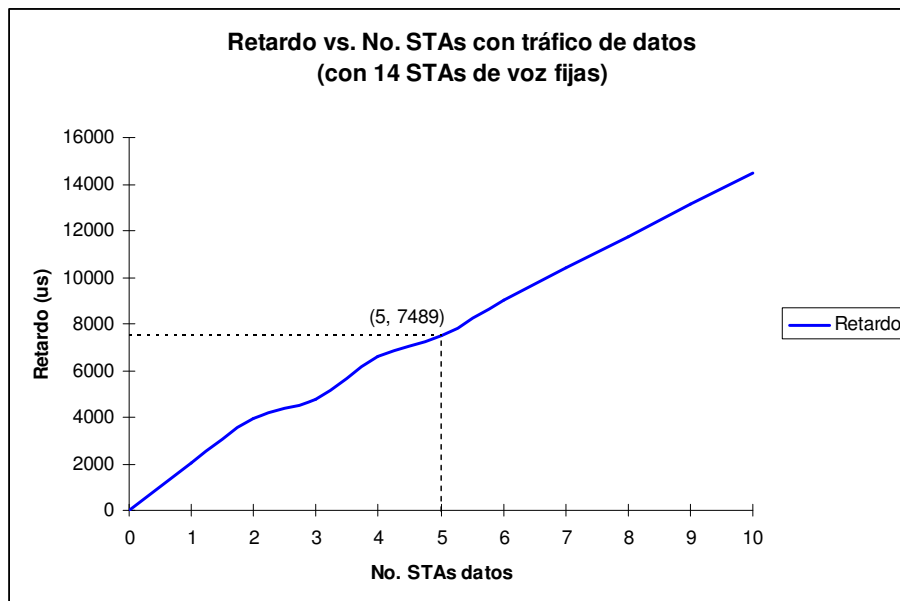


Figura 54. Retardo vs. No. STAs con tráfico de datos (con 14 STAs de voz fijas)

#### 5.4.5.2 Resumen de resultados y validación del diseño propuesto.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente la validación del diseño propuesto en el capítulo 4 se encuentra completamente justificada mediante el profundo análisis realizado en los diferentes escenarios. Además, dado que este trabajo de grado está orientado hacia una estimación de la capacidad del sistema a continuación, en la Tabla 15, se muestra el número de usuarios que cada AP está en capacidad de soportar dependiendo si el entorno es de una celda o multicelda.

**Tabla 15. Número de estaciones según el escenario**

Escenario	Cantidad de APs	Número de estaciones		Rango de Cobertura
<b>Voz</b>				
Una celda omnidireccional	1	18		3 Km <sup>2</sup>
Una celda sectorizada	3	48		
Multicelda (Un <i>cluster</i> con K=3)	9	≈100		9 Km <sup>2</sup>
<b>Voz y Datos</b>				
Celda omnidireccional	1	19		3 Km <sup>2</sup>
		14 de voz	5 de datos	
Multicelda (Un <i>cluster</i> con K=3)	9	128		9 Km <sup>2</sup>
		99 de voz	29 de datos	

Es así como a través de este capítulo se abordó una metodología de simulación que permitió el estudio del comportamiento de las variables *throughput*, retardo y pérdida de paquetes en distintos escenarios, partiendo de un análisis del tráfico de voz a nivel de una celda hasta llegar a una estimación aproximada de la capacidad de un AP a nivel de un *cluster* tanto para tráfico de voz como de datos. De esta manera se logró validar el diseño propuesto en el capítulo anterior presentando el *throughput* y la pérdida de paquetes una variación notoria a medida que se varía el número de estaciones en cada AP llegando a un número estimado de 128 estaciones (99 de voz y 29 de datos) en un *cluster* con 3 celdas, cada una con un radio de 1 Km, es decir, se proporciona una cobertura aproximada de 9 Km<sup>2</sup>.



## 6. CONCLUSIONES

- Durante el desarrollo de este trabajo de grado se recopilaron los conceptos relacionados con WLAN, tecnología celular, y VoIP con el propósito de generar una base teórica que permita identificar sus principales inconvenientes y ventajas, convirtiéndose estas últimas en un soporte para la generación de un conjunto de criterios para el diseño de una red WLAN multicelda en entornos *outdoor* que soporta el estándar IEEE 802.11e.
- Mediante el estudio detallado del estándar 802.11e y del impacto de la elección de *códex* de voz sobre el ancho de banda se logró realizar una estimación teórica del número de clientes que cada AP puede soportar, es decir, se realizó un dimensionamiento de VoIP sobre WLAN destacándose una variación entre el valor teórico estimado y el obtenido en la simulación. Lo anterior como consecuencia de la suposición inicial de ciertos eventos y la fijación de algunos parámetros con el fin de facilitar los cálculos matemáticos.
- Se demostró a nivel de simulación el impacto del número de PPS transmitidos y del tamaño de la carga útil sobre el número de usuarios por AP obteniendo un máximo de 28 estaciones al hacer uso del *códex* G.729 en una celda con patrón omnidireccional imponiéndose así sobre el *códex* G.711 que presenta un elevado consumo de ancho de banda.
- La elaboración de una guía basada en criterios de implementación de redes WLAN multicelda *outdoor* con soporte para 802.11e se convierte en un aporte valioso que brinda orientación hacia soluciones efectivas que conlleven a satisfacer las necesidades de capacidad, cobertura y calidad entre múltiples celdas, ya que se fundamenta en un análisis previo de las soluciones de los problemas relacionados con los entornos *outdoor*; de las ventajas provistas por una tecnología robusta, confiable y ampliamente conocida como es el caso de la telefonía celular; y de la facilidad de despliegue y bajo costo de la tecnología Wi-Fi.
- Se demostró el incremento en el número de estaciones servidas por una celda con tres sectores de 120° frente al patrón omnidireccional que se utiliza tradicionalmente. Esto se logró mediante un espaciamiento mínimo de 5 canales entre los sectores adyacentes, lo cual es una característica propia del nivel físico del estándar IEEE 802.11b.
- La aplicación de una metodología de simulación adecuada permitió abordar todo el proceso de simulación desde una perspectiva secuencial, ordenada y clara que contribuyó con la selección de la mejor herramienta de simulación a partir de una definición previa del problema dando como resultado la elección del simulador NCTUns 3.0.
- Se realizó un análisis de resultados y la determinación de la capacidad de cada AP desde un punto de vista orientado hacia el cumplimiento de los requerimientos de QoS sugeridos por la recomendación ITU- T G.1010. Este hecho sirve de soporte para garantizar la prestación de servicios de voz y datos de tal manera que se cumplan las expectativas del cliente.

- Se comparó a nivel de una celda, el comportamiento de 802.11e frente a la transmisión simultánea de voz y datos observándose una pequeña disminución en el número de estaciones de voz que un AP puede soportar comprobando así la prioridad asignada por 802.11e a las aplicaciones de voz sobre las de datos. Como consecuencia se propuso un factor que relaciona el número de usuarios de voz y datos que pueden ser atendidos por un AP realizando una proyección de capacidad de 128 estaciones por *cluster* bajo niveles de *throughput*, retardo y pérdida de paquetes aceptables.
- Los parámetros que presentaron una variación drástica a medida que se aumentó el número de estaciones clientes fueron la pérdida de paquetes y el *throughput*. En particular, se mostró un método para la escogencia del número de clientes de acuerdo a la tasa de paquetes entrantes en la estación receptora (*throughput*) estableciendo una cota ideal equivalente a la CBR del *códec* empleado y una cota mínima que consiste en el 10% del valor ideal. Este valor se escogió de acuerdo a estudios experimentales que muestran que al registrarse un *throughput* inferior a tal valor se refleja en la caída de la llamada. En cuanto al retardo, se obtuvieron resultados que oscilaron entre 1 y 10 *ms*, tiempos que se encuentran dentro del límite de retardo sugerido por las recomendaciones G.1010 y G.114.
- A nivel de una celda, la separación de canales adecuada junto a la implementación de antenas sectoriales, permitió que la capacidad brindada por cada AP del sector no se viera afectada considerablemente, logrando de esta manera ofrecer una capacidad similar a la obtenida en el escenario monocelda omnidireccional.
- A nivel de un *cluster* se presencié una disminución de la capacidad de cada AP soportando como máximo 11 estaciones con tráfico de voz. Este comportamiento se debe en gran medida al notorio incremento del número de estaciones que están transmitiendo en todo el *cluster*, además del incremento de las actividades realizadas por los *switches*, la contienda por el medio por parte de todas las estaciones, y la presencia de interferencias causadas por éstas en celdas adyacentes. Sin embargo, para una cobertura aproximada de 9.4 Km<sup>2</sup>, un *cluster* está en la capacidad de soportar alrededor de 100 clientes de voz (*códec* G.711) bajo unos niveles de *throughput*, retardo y pérdida de paquetes enmarcados en la recomendación G.1010. Este hecho confirma la importancia de aplicar técnicas como el re-uso de frecuencias y sectorización para incrementar la capacidad de un sistema.
- A partir del análisis de resultados a nivel multicelda se validó el diseño propuesto en el capítulo 4 comprobando así la aplicación de los criterios propuestos a lo largo de este trabajo de grado.

## 7. RECOMENDACIONES

- A pesar de las múltiples ventajas de HCCA, hasta el momento no se han encontrado estudios relacionados con su comportamiento en entornos multicelda por lo que se recomienda un estudio a nivel de simulación para una posterior comparación con los resultados propuestos en este trabajo de grado.
- La verdadera validación de los resultados arrojados por una simulación se lleva a cabo cuando se compara con aquellos obtenidos en entornos de experimentación reales. Para conseguir esto, NCTUns posee una funcionalidad de emulación que permite la conexión de dispositivos reales a la estación sobre la cual se encuentra instalado NCTUns. Esto permite una manipulación de información de primera mano con base en el comportamiento real de los dispositivos de la red en estudio, razón por la cual es recomendable explotar esta característica permitiendo así un análisis más certero de las variables de interés.
- Entre las limitaciones del simulador se encontró la imposibilidad de proporcionar una diferenciación de las tramas de datos a nivel del *switch* conllevando a la pérdida de la proporción de QoS extremo a extremo. Esta limitación sugiere un posible estudio que analice los mecanismos de mapeo de tramas a través de redes heterogéneas, comenzando por redes WLAN 802.11e a nivel de acceso, atravesando luego redes Ethernet o *backbones* con arquitecturas de QoS como DiffServ, hasta finalmente llegar a los enlaces WAN.
- Resulta interesante observar el comportamiento de 802.11e bajo esquemas de modulación como OFDM utilizados por los niveles físicos de 802.11a y 802.11g debido al ancho de banda del que se dispone, razón por la cual es importante analizar la viabilidad de la proporción de servicios de voz, video y datos (*Triple Play*) en entornos con tales características.
- A pesar de que uno de los objetivos de este trabajo de grado era el análisis del comportamiento del estándar 802.11e cuyas modificaciones tienen efecto a nivel MAC es de igual importancia considerar el efecto de un riguroso estudio a nivel físico sobre el desempeño de una red WLAN de tal manera que la QoS provista por 802.11e se vea complementada por una correcta planeación sobre el enlace radio, aspecto primordial en cualquier tecnología inalámbrica.

## 8. REFERENCIAS

- [1]. Cisco, "Understanding Delay in Packet Voice Networks". Documento PDF disponible en: <http://www.cisco.com/warp/public/788/voip/delay-details.pdf>
- [2]. Gonia, Karie. "Latency and QoS for Voice over IP". Página web disponible en <http://www.sans.org/rr/papers/index.php?id=1349>
- [3]. Vocal Technologies Ltd. "Códex VoIP". Página web disponible en: <http://www.vocal.com/index.html>
- [4]. Newport Networks. "VoIP Bandwidth Calculation". Documento PDF disponible en: <http://www.newport-networks.com/cust-docs/52-VoIP-Bandwidth.pdf>
- [5]. iLBC Freeware, "What is iLBC?". Página web disponible en: <http://www.ilbcfreeware.org>
- [6]. AMR "The Ultimate Narrowband Voice Compression Standard". Página web disponible en: <http://www.voiceage.com/amr.php>
- [7]. Wallingford, Theodore. "Switching to VoIP". Página web disponible en: <http://safari.oreilly.com/0596008686>
- [8]. Johnston, Alan. "SIP : Understanding the Session Initiation Protocol (Second Edition)". Norwood, MA, USA: Artech House, Incorporated, 2003. p 269. Documento web disponible en: <http://site.ebrary.com/lib/biblioucauca/Doc?id=10082016&ppg=293>
- [9]. Universidad Nacional de Rosario - Área De Comunicaciones Eléctricas, "Introducción a la telefonía celular", 2004. Documento PDF disponible en: <http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/ftp/Tecnologias%20de%20banda%20angosta/introduccion%20telefon%EDa%20celular%202003.pdf>
- [10]. UMTS World, "3G Network Planning Basics", 2003. Página Web disponible en: <http://www.umtsworld.com/technology/technology.htm>
- [11]. Montoya, A y Ortega, J. "Criterios para Interconexión de Sitios Remotos bajo los Estándares IEEE 802.11 y 802.16" Proyecto de Grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca. Popayán, 2005.
- [12]. Estándar IEEE 802.11a, "Supplement to IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-speed Physical Layer Extension in the 5 Ghz Band", 2003. Documento PDF disponible en: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11a-1999.pdf>
- [13]. Estándar IEEE 802.11b, "Supplement to IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 Ghz Band", 2003. Documento PDF disponible en: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11b-1999.pdf>
- [14]. Estándar IEEE 802.11g, "Supplement to IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 Ghz Band. Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band", 2003. Documento PDF disponible en: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11g-2003.pdf>
- [15]. Gozdecki, Janusz., Jajszczyk, Andrzej. y Stankiewicz Rafal. "Quality of Service Terminology in IP Networks", 2003. Documento PDF disponible en: [http://sertel.upc.es/qos/documentos/13\\_Vicente\\_Paul.pdf](http://sertel.upc.es/qos/documentos/13_Vicente_Paul.pdf)

- [16]. Estándar IEEE 802.11, "IEEE Standard for Information technology- Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications", 1999. Documento PDF disponible en: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-1999.pdf>
- [17]. Intel White Paper, "Providing QoS in WLANs: How the IEEE 802.11e Standard QoS Enhancements Will Affect the Performance of WLANs", 2004. Documento PDF disponible en: [http://www.intel.com/network/connectivity/resources/doc\\_library/white\\_papers/303762.htm](http://www.intel.com/network/connectivity/resources/doc_library/white_papers/303762.htm)
- [18]. EuroNGI, "QoS in multi-service wireless networks - State of the art", 2004. Documento PDF disponible en: <http://eurongi.enst.fr/archive/127/DWPJRA241.pdf>
- [19]. Estándar IEEE 802.11e, "IEEE Standard for Information technology- Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. Amendment 8: Medium Access Control (MAC) - Quality of Service Enhancements", 2005. Documento PDF disponible en: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11e-2005.pdf>
- [20]. Epshtein, Gil. "How to assure QoS over WLAN for consumer electronics", 2006. Página web disponible en: <http://www.networksystemsdesignline.com/howto/metronetworking/190500325>
- [21]. Selvakennedy, S. "The Impact of Transmit Buffer on EDCA with Frame-Bursting Option for Wireless Networks", 2004. Documento PDF disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9433/29935/01367309.pdf>
- [22]. BreezeCom, "A technical tutorial on the IEEE 802.11 protocol", 1997. Documento PDF disponible en: [http://www.sss-mag.com/pdf/802\\_11tut.pdf](http://www.sss-mag.com/pdf/802_11tut.pdf)
- [23]. Radionet, "Deploying WLAN in outdoor networks", 2004. Documento PDF disponible en: [www.radionet.com/ FileRoot/318025.pdf](http://www.radionet.com/FileRoot/318025.pdf)
- [24]. Global Knowledge, "Wireless Bandwidth-Not Necessarily as Advertised", 2006. Documento PDF disponible en: [http://images.globalknowledge.com/wwwimages/whitepaperpdf/Wireless\\_WP.pdf](http://images.globalknowledge.com/wwwimages/whitepaperpdf/Wireless_WP.pdf)
- [25]. Bianchi, G. "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function", 2000. Documento PDF disponible en: [http://www.ece.utexas.edu/~jandrews/ee381k/EE381KTA/802.11\\_throughput.pdf](http://www.ece.utexas.edu/~jandrews/ee381k/EE381KTA/802.11_throughput.pdf)
- [26]. Cali, F., Conti, M y Gregori, E. "Dynamic Tuning of the IEEE 802.11 Protocol to Achieve a Theoretical Throughput Limit", 2000. Documento PDF disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/90/19340/00893874.pdf?arnumber=893874>
- [27]. Chuang, J., Qiu, X. y Whitehead, J. "Data Throughput Enhancement in Wireless Packet Systems by Improved Link Adaptation with Application to the EDGE System", 1999. Documento PDF disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/90/19340/00893874.pdf?arnumber=893874>
- [28]. Leung, Kin K., McNair, Bruce., Cimini, Leonard J Jr. y Winters, Jack H. "Outdoor IEEE 802.11 Cellular Networks: MAC Protocol Design and Performance", 2001. Documento PDF disponible en: <http://www.bell-labs.com/user/kin/papers/802.11.mac2.pdf>
- [29]. Clark, Martin V., Leung, Kin K., McNair, Bruce y Kostic, Zoran. "Outdoor IEEE 802.11 Cellular Networks: Radio Link Performance", 2002. Documento PDF disponible en: <http://www.bell-labs.com/user/kin/papers/802.11.radio.pdf>
- [30]. Air Live, "Building an outdoor network", 2006. Documento PDF disponible en: <http://www.airlive.com>

- [31]. Mompó, Maria José., Corral, Pablo., Segrelles, Jesús. y Pierucci, Laura, “Herramienta gráfica para la predicción de coberturas IEEE 802.11a/b/g en interiores, exteriores y espacio libre”, 2005. Documento PDF disponible en: [http://w3.iec.csic.es/URSI/articulos\\_gandia\\_2005/articulos/ED2/556.pdf](http://w3.iec.csic.es/URSI/articulos_gandia_2005/articulos/ED2/556.pdf)
- [32]. Tamminen, Jani. “2.4 GHz WLAN Radio Interface”, 2002. Documento PDF disponible en: <http://www.radionet.com/FileRoot/318040.pdf>
- [33]. Sipro Lab Telecom, “The G.729 Consortium Price Schedule” Página Web disponible en: <http://www.sipro.com/pricelist.php>
- [34]. Alonso, M.A., Bueno, C. “Simuladores UMTS”, 2004. Documento PDF disponible en: <http://trajano.us.es/~fornes/RSR/2005/UMTS/Simuladores%20UMTS%20-%202005.pdf>
- [35]. Ek, Niclas. “Department of Electrical Engineering Helsinki University of Technology, “IEEE 802.1 P, Q - QoS on the MAC level”. Página web disponible en: <http://www.tml.tkk.fi/Opinnot/Tik-10.551/1999/papers/08IEEE802.1QosInMAC/qos.html>.
- [36]. Park, Seyong., Kim, Kyungtae., Kim, Doug C., Choi, Sunghyun y Hong, Sangjin, “Collaborative QoS Architecture between DiffServ and 802.11e Wireless LAN”, 2003. Documento PDF disponible en: <http://www.mwnl.snu.ac.kr/~schoi/publication/Conferences/03-VTC-DiffServ.pdf>
- [37]. Ministerio de Comunicaciones, “Resolución Número 000689”, 2004. Documento PDF disponible en: <http://www.mincomunicaciones.gov.co>
- [38]. Cisco, “Outdoor Wireless Applications Guide for Access Points and Bridges”, 2005. Documento PDF disponible en: [http://www.cisco.com/warp/public/cc/pd/witc/ao340ap/prodlit/outdo\\_br.pdf](http://www.cisco.com/warp/public/cc/pd/witc/ao340ap/prodlit/outdo_br.pdf)
- [39]. Del Prado Pavón, Javier y Shankar N. Sai, “Impact of frame size, number of stations and mobility on the throughput performance of IEEE 802.11e”, 2004. Página Web disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/iel5/9178/29115/01311287.pdf?tp=&arnumber=1311287&isnumber=29115>
- [40]. Yu, Jeonggyun., Choi, Sunghyun., y Lee, Jaehwan. “Enhancement of VoIP over IEEE 802.11 WLAN via Dual Queue Strategy”, 2003. Documento PDF disponible en: <http://mwnl.snu.ac.kr/~schoi/publication/Conferences/04-ICC.pdf>
- [41]. Braskish, T., Esmavatkul, N., Emeott, S., Wilsont T. “Link Adaptation Evaluation for WLAN Using a voice Quality Metric”, 2004. Documento PDF disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9481/30081/01378949.pdf>
- [42]. Dangerfield, Ian. , Malone, David y J. Leith, Douglas. “Experimental Evaluation of 802.11e EDCA for Enhanced Voice over WLAN Performance”, 2005. Documento PDF disponible en: <http://www.winmee.org/papers/02-05.pdf>
- [43]. Cisco, “Channel Deployment Issues for 2.4GHz 802.11 WLANs”, 2006. Página Web disponible en: [http://www.cisco.com/en/US/products/hw/wireless/ps430/prod\\_technical\\_reference\\_09186a00802846a2.html](http://www.cisco.com/en/US/products/hw/wireless/ps430/prod_technical_reference_09186a00802846a2.html)