



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN REDES Y
COMUNICACIÓN DE DATOS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO ELECTRÓNICO EN REDES Y COMUNICACIÓN DE
DATOS**

**TEMA: ESTUDIO COMPARATIVO TEÓRICO-PRÁCTICO ENTRE LOS
ESTÁNDARES WLAN 802.11N Y 802.11AC**

AUTOR: ALVAREZ CAIZA, DIEGO FERNANDO

DIRECTOR: ING. VEGA MUÑOZ, CHRISTIAN NESTOR

SANGOLQUÍ

2018



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE REDES DE INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN DE
DATOS**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “*ESTUDIO COMPARATIVO TEÓRICO-PRÁCTICO ENTRE LOS ESTÁNDARES WLAN 802.11N Y 802.11AC*” fue realizado por el señor *Alvarez Caiza, Diego Fernando* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 05 de Diciembre del 2018

Firma:

.....

Ing. Christian Néstor Vega Muñoz

C.C.: *1709328353*.....



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y

TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE REDES DE INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN DE

DATOS

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Alvarez Caiza, Diego Fernando*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *Estudio Comparativo Teórico-Práctico entre los Estándares WLAN 802.11n y 802.11ac* es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 05 de Diciembre del 2018

Firma:

Diego Fernando Alvarez Caiza

C.C.: 1717836439.....



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE REDES DE INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN DE
DATOS

AUTORIZACIÓN

Yo, **Alvarez Caiza, Diego Fernando** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Estudio Comparativo Teórico-Práctico entre los Estándares WLAN 802.11n y 802.11ac** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 05 de Diciembre del 2018

Firma:

Diego Fernando Alvarez Caiza

C.C.: 1717836439

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a Dios, mi familia y todos mis amigos. Me han acompañado en este caminar, me han levantado, me han sostenido y siempre me han mostrado que soy grande. Gracias por todo. Soy lo que soy por ustedes.

A mis viejitos que ya no los tengo aquí, a mi abuelita Elsitita, a mi abuelita Lucrecia y a mi abuelito Luis. A mi abuelito Segundo tengo que decirle que es mi vida, compartí tantas cosas con él, en el estadio, en la casa, en donde la vida nos puso, y siempre me amaste y me cuidaste. Gracias por haberme dado tanto amor a lo largo de toda mi vida.

A ti Rambo. Después de mi madre creo que es el que mejor me conoció y al que más cosas le he contado. Fuiste amor y nada más. Gracias hijo.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme devuelto la oportunidad de vivir en dos ocasiones, demostrarme que me ama infinitamente y que si yo me entrego a su voluntad todo estará bien.

A mi madre, Marcia, que yo sin ella no llegara a ningún lugar. Gracias madre por todo. La amo con todo mi corazón.

A mis hermanas, Marcia y Ana María, son mi vida. Gracias por ayudarme y ser mi apoyo. Gracias por tanto ñañas.

A mi padre, Luis, por sus conversaciones y haberme dado más de un consejo que me han servido. Gracias papi.

A toda mi familia, a mis tías Elsa, Kelly, Irma, Carmen; a mis tío Víctor; a mis primas Rossmary, Kathy, Johana, Cristina, Tatiana y Daniela; a mis primos Alex y David, por confiar en mí, apoyarme y quererme. A mi tía Fátima y a mi tío Elvis debo decir que sin su apoyo no hubiera podido haber comenzado. Aún recuerdo cuando llegue ese día al centro sin saber qué hacer, y mi tía Fátima me dijo que me tranquilice. Y luego mi tío Elvis que me ayudó para poder sacar el préstamo en el IECE y poder comenzar otra vez. La verdad es que no sé qué hubiera hecho sin su ayuda. Gracias.

A cada uno de mis amigos de la ESPE, en especial a Leonardo, Alexis, Lenin, Diego, Cristian y Miguel, por haberme ayudado en más de una forma a terminar la carrera. Sin duda alguna no podría estar ahora aquí sin su ayuda.

A mí querida comunidad, Andrés, Daniel, Miguel, Hernán, Karina y Julissa. Gracias por todo lo que compartimos en la Poli y hasta ahora, por absolutamente todo. Por todos los conesjos,

por haber sido mí acolite en un montón de cosas, por todas las chumas. Siempre los llevo en mi corazón. Y después de todo nunca nos separamos y espero que siga siendo así.

A mis amigos de toda la vida, los del barrio, los NTN, Javier, Alberto, Carlos, Cristian Guevara, Cristian Alvarez, César, Ronny, Daniel Torres, Daniel Auquilla, Fernando, Mauricio, Andrés, Xavier. Gracias por todo amigos. Por cuidarme, aconsejarme y acompañarme en mi caminar. Por permitirme acompañarles a hacer pendejadas y no dejarme hacer más pendejadas de las que he hecho jajaja. Gracias por ser parte de mi vida

A Tashunka Suricata y Wayky Micha. A todos y cada uno de ustedes. Por haberme permitido experimentar lo maravilloso que es darse a los demás. Y ante todo en urgenciaaaaaaaaaa jajaja. Me cambiaron la vida. Yo soy tu, tu eres yo. Yo existo porque tú existes.

A mis amigos de la iglesia: Pedro, Fernando, Nelson, Cristina, Andrés, Prisy, Kathy, Dolo. Gracias por todo. Dios escribe en líneas torcidas.

A mis compañeros del trabajo, en especial a: Fran, Cari, Fabi, Juanito, Leila y Erick. Gracias ayudarme cuando he tenido que pedir permiso y por apoyarme, y más que todo por haberme permitido ver el mundo de una manera diferente.

A todos los ingenieros que me dieron clases, por su dedicación y esfuerzo. En especial al Ing. Darwin Aguilar, Ing. Christian Vega y al Dr. Nikolai Espinosa. Gracias por haberme permitido comenzar, desarrollar y terminar mi proyecto de titulación, gracias por ayudarme a cerrar una etapa de mi vida.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
RESUMEN.....	xxi
ABSTRACT	xxii
CAPÍTULO I.....	1
MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Modelo OSI	3
1.3 Redes inalámbricas.....	5
1.3.1 Conceptos básicos de redes inalámbricas.....	6
1.3.2 Parámetros de una red inalámbrica	7
1.3.3 Arquitectura de las redes inalámbricas.....	9
1.3.4 Modos de operación de las redes inalámbricas	10
1.3.5 Seguridades en una red inalámbrica.....	12
CAPÍTULO II	17

ESTÁNDARES WLAN	17
2.1 IEEE 802.11	17
2.2 802.11b	17
2.3 802.11a	18
2.4 802.11g	18
2.5 Compatibilidad internacional y canales entre 802.11b y 802.11g.....	18
2.6 802.11n	19
2.6.1 Capa física	20
2.6.1.1 MIMO.....	20
2.6.1.1.1 Antecedentes	20
2.6.1.1.2 Técnicas de transmisión de MIMO.....	24
2.6.1.1.2.1 Diversidad de antenas	24
2.6.1.1.2.2 Multiplexación espacial	27
2.6.1.1.2.3 Beamforming.....	28
2.6.1.1.3 Flujo espacial	31
2.6.1.1.4 Cadenas de radio	33
2.6.1.1.5 Multitrayecto.....	36
2.6.1.1.6 Clasificación	37
2.6.1.1.7 Funcionamiento	38
2.6.1.2 Canales de 20 y 40 MHz	39
2.6.1.3 Modulación.....	41
2.6.1.4 Intervalo de guarda (GI).....	43
2.6.1.5 Set de codificación y modulación (MCS)	44

2.6.1.6	Código de verificación de paridad de baja densidad (LDPC).....	45
2.6.1.7	Frame PLCP	45
2.6.1.8	Proceso de transmisión y recepción	46
2.6.1.9	Velocidades de 802.11n	48
2.6.1.9.1	802.11a/g vs 802.11n (1x1)	49
2.6.1.9.2	20 MHz vs 40 MHz	49
2.6.2	Capa de Enlace. Subcapa de Control de Acceso al Medio.....	50
2.6.2.1	Técnicas de agregación de paquetes.....	51
2.6.2.1.1	Aggregation MAC Service Data Unit (A-MSDU)	51
2.6.2.1.2	Aggregation MAC Protocol Data Unit (A-MPDU).....	52
2.6.2.2	Block Acknowledgment	53
2.6.2.3	Protección de transmisiones no-HT	54
2.6.2.3	Selección del ancho del canal.....	55
2.7	802.11ac.....	56
2.7.1	Capa física.....	57
2.7.1.1	MU-MIMO.....	57
2.7.1.1.1	Beamforming	59
2.7.1.1.1.1	Null Data Packet	60
2.7.1.1.2	Single User (SU) beamforming	63
2.7.1.1.2.1	Calibración del canal para SU beamforming	63
2.7.1.2	Canales de 80 y 160 MHz.....	67
2.7.1.3	Set de codificación y modulación (MCS)	71
2.7.1.4	Modulación 256-QAM.....	72

2.7.1.5	Intervalo de guarda (GI).....	74
2.7.1.6	Códigos de corrección de error	74
2.7.1.7	Trama de la capa física.....	75
2.7.1.8	Proceso de transmisión y recepción	76
2.7.1.9	Matriz de velocidad.....	80
2.7.2	Capa de Enlace. Subcapa de control de acceso al medio	81
2.7.2.1	Entramado	81
2.7.2.2	Agregación y tamaño de la trama.....	82
2.7.2.3	Procedimientos de acceso al medio.....	83
2.7.2.3.1	Evaluación de canal limpio.....	83
2.7.2.3.2	Protección y coexistencia entre dispositivos 802.11	85
2.7.2.3.3	Operaciones de ancho de banda dinámicas (RTS/CTS)	85
CAPÍTULO III		88
MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE LOS ESTÁNDARES 802.11n Y 802.11ac		88
3.1	Introducción.....	88
3.2	Canal inalámbrico.....	88
3.3	Desvanecimiento	89
3.3.1	Modelo de desvanecimiento Rayleigh	89
3.3.2	Modelo de desvanecimiento Rician	90
3.3.3	Factor de Rician	90
3.4	Modelamiento del canal 802.11n	91
3.4.1	Correlación espacial y modelo de Kronecker	92
3.4.2	AoA y AoD	94

3.5	Modelamiento del canal 802.11ac	95
3.5.1	Modificaciones implementadas	95
3.5.1.1	Modificaciones en AoA y AoD para MU-MIMO	96
3.5.2	Modelamiento del canal MU-MIMO	96
3.6	Simulación de 802.11n y 802.11ac	98
3.6.1	Condiciones para implementar la simulación	98
3.6.2	Estructura del programa	98
3.6.2.1	Función estandar_n	100
3.6.2.2	Función Angulos_Modelo_A	101
3.6.2.3	Función OFDM	101
3.6.2.3.1	Función OFDMModulator	102
3.6.2.4	Función Generar_Datos	103
3.6.2.5	Función Modulacion	104
3.6.2.6	Función Matriz_Correlacion_A	105
3.6.2.7	Función MimoChannel	107
3.6.2.8	Función OFDM_MIMO	109
3.6.2.9	Función Perdida	110
3.6.2.10	Función Resultados	111
3.6.2.11	Función estandar_ac	113
3.6.2.12	Función Angulos_Modelo_B_C1	113
3.6.2.13	Función Angulos_Modelo_B_C2	114
3.6.2.14	Función Matriz_Correlacion_B	115
3.7	Escenarios de prueba	117

CAPÍTULO IV	118
PRUEBAS PRÁCTICAS DE LOS ESTÁNDARES 802.11n Y 802.11ac.....	118
4.1 Equipos utilizados	118
4.1.1 Archer C7 AC1750 Wireless Dual Band Gigabit Router	118
4.1.1.1 Configuración del Archer C7 AC1750 Wireless Dual Band Gigabit	119
4.1.2 Archer T9E AC1900 Wireless Dual Band PCI Express	122
4.1.2.1 Configuración del Archer T9 AC1900 Wireless Dual Band PCI Express.....	123
4.1.3 Dual Band Wireless AC 7260	127
4.1.3.1 Configuración del Dual Band Wireless AC 7260	127
4.1.4 Equipos finales	128
4.2 Programas utilizados	128
4.2.1 iPerf	128
4.2.2 Acrylic WiFi.....	130
4.3 Topología.....	130
4.4 Escenarios de prueba	131
CAPÍTULO V	133
ANÁLISIS DE RESULTADOS	133
5.1 Resultados simulación	133
5.1.1 Simulación modelo A.....	133
5.1.2 Simulación modelo B	135
5.2 Resultados parte práctica.....	136
5.2.1 Escenarios del 1 al 8.....	136
5.2.2 Mapas de calor	142

CAPÍTULO VI..... 145

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 145

6.1 Conclusiones..... 145

6.2 Recomendaciones..... 146

BIBLIOGRAFÍA..... 147

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Comparación de tecnologías beamforming</i>	31
Tabla 2 <i>Comparación de la eficiencia espectral</i>	32
Tabla 3 <i>Descripción de portadoras de cada estándar</i>	41
Tabla 4 <i>Tamaño de bloque LDPC y velocidades</i>	45
Tabla 5 <i>Tabla comparativa de velocidad entre 802.11a/g vs velocidad 802.11n equivalente</i>	50
Tabla 6 <i>Velocidades en 20 MHz</i>	50
Tabla 7 <i>Velocidades en 40 MHz</i>	51
Tabla 8 <i>Parámetros de la matriz de retroalimentación</i>	63
Tabla 9 <i>Descripción de los atributos del canal</i>	69
Tabla 10 <i>Valores de la máscara espectral dependiendo el ancho del canal</i>	70
Tabla 11 <i>Valores de MCS para 802.11ac</i>	71
Tabla 12 <i>Modelos WLAN SISO</i>	92
Tabla 13 <i>Separación de taps según el ancho del canal</i>	96
Tabla 14 <i>Parámetros para la función OFDM Modulator</i>	103
Tabla 15 <i>Comparación entre 802.11n y 802.11ac Wave 1</i>	119
Tabla 16 <i>Características de los host</i>	128
Tabla 17 <i>Direccionamiento de la topología</i>	131
Tabla 18 <i>Escenarios de simulación</i>	132
Tabla 19 <i>Comparación entre los valores simulados y los prácticos</i>	141

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Modelo OSI	2
<i>Figura 2.</i> Arquitectura de redes inalámbricas	9
<i>Figura 3.</i> STAs en modo Ad Hoc.....	10
<i>Figura 4.</i> Modo infraestructura	11
<i>Figura 5.</i> Proceso de roaming.....	12
<i>Figura 6.</i> Canales en la banda de 2,4 GHz	19
<i>Figura 7.</i> Sistema MISO: diversidad de antenas (transmisor) y beamforming	23
<i>Figura 8.</i> Sistema SIMO: diversidad de antenas (receptor)	23
<i>Figura 9.</i> Típico sistema Smart Antenna.....	23
<i>Figura 10.</i> Sistema MIMO	24
<i>Figura 11.</i> Esquema de un receptor que usa diversidad por selección.....	25
<i>Figura 12.</i> Esquema de un receptor que usa diversidad por conmutación	25
<i>Figura 13.</i> Esquema de un receptor que usa diversidad por combinación.....	26
<i>Figura 14.</i> Diagrama de bloques de un transmisor con diversidad de código.....	27
<i>Figura 15.</i> Multiplexación y demultiplexación espacial	28
<i>Figura 16.</i> Tecnología beamforming.....	29
<i>Figura 17.</i> MIMO multiusuario (4 flujos, 3 usuarios).....	32
<i>Figura 18.</i> Diagrama de bloques de una interfaz 802.11n de 4x4.....	34
<i>Figura 19.</i> Incremento de rangos usando MRC	35
<i>Figura 20.</i> MIMO con multitrayecto.....	36
<i>Figura 21.</i> Señales ligeramente desfasadas y el producto se su suma.....	37

Figura 22. Esquema general de un sistema MIMO	39
Figura 23. Comparación entre 802.11a/g y 802.11n.....	40
Figura 24. Comparación entre un canal 802.11n de 20 MHz y un canal de 40 MHz.....	40
Figura 25. Diagrama de constelación para los esquemas BPSK, QPSK, 16-QAM.....	42
Figura 26. Diagrama de constelación para el esquema 64-QAM	42
Figura 27. Comparación entre un intervalo de guarda largo y un intervalo de guarda corto.....	44
Figura 28. Diagrama de bloques de un transmisor 802.11n.....	48
Figura 29. Encapsulamiento A-MSDU	52
Figura 30. Encapsulamiento A-MPDU	52
Figura 31. Transmisiones: sin Block ACK (a), con Block ACK (b)	53
Figura 32. Comparación entre a) un sistema MU-MIMO y, b) un sistema MIMO.....	58
Figura 33. MU-MIMO usando beamforming y null steering hacia multiples STAs	58
Figura 34. Proceso de beamforming	59
Figura 35. Procedimiento para la calibración del canal en SU	64
Figura 36. Formato de la trama de NDP Announcement.....	64
Figura 37. Formato de una trama NDP	65
Figura 38. Formato de Compressed Beamforming Action Frame para SU.....	67
Figura 39. Disposición de los canales de radio	68
Figura 40. Máscara espectral.....	69
Figura 41. Mapa de canales disponibles para 802.11ac	70
Figura 42. Comparación entre modulaciones.....	72
Figura 43. Vectores error	73
Figura 44. Formato del frame de la capa física VHT.....	75

Figura 45. Diagrama de bloques para 802.11a SU.....	78
Figura 46. Calculo del throughput para 802.11ac	80
Figura 47. Trama MAC de 802.11ac	82
Figura 48. Formato de una trama A-MPDU	82
Figura 49. Canales primarios y secundarios dependiendo el ancho de banda	84
Figura 50. Coexistencia de dos redes dentro del mismo rango de frecuencias.....	84
Figura 51. Transmisión de tramas CTS duplicadas	86
Figura 52. Mapa de canales.....	87
Figura 53. Transmisión en el tiempo.....	87
Figura 54. Sistema MIMO 2x2	93
Figura 55. Ángulos AoA y AoD	95
Figura 56. Esquema MU-MIMO downlink	97
Figura 57. Matriz MU-MIMO.....	97
Figura 58. Diagrama de flujo para las simulaciones	99
Figura 59. Diagrama de flujo del estándar 802.11n.....	99
Figura 60. Diagrama de flujo del estándar 802.11ac	100
Figura 61. Función estandar_n.....	100
Figura 62. Función Angulos_Modelo_A	101
Figura 63. Función OFDM para 802.11n.....	101
Figura 64. Función OFDM para 802.11ac	101
Figura 65. Función Generar_Datos	103
Figura 66. Función Modulacion.....	104
Figura 67. Diagrama de flujo de la función Matriz_Correlacion_A.....	105

Figura 68. Función Matriz_Correlacion_A.....	106
Figura 69. Función MimoChannel.....	107
Figura 70. Diagrama de flujo de la función OFDM_MIMO.....	109
Figura 71. Función OFDM_MIMO.....	110
Figura 72. Función Perdida.....	110
Figura 73. Función Resultados.....	111
Figura 74. Función estandar_ac.....	113
Figura 75. Función Angulos_Modelo_B_C1 caso 1.....	113
Figura 76. Función Angulos_Modelo_B_C1 caso 2.....	113
Figura 77. Función Angulos_Modelo_B_C2 caso 1.....	114
Figura 78. Función Angulos_Modelo_B_C2 caso 2.....	114
Figura 79. Diagrama de flujo de la función Matriz_Correlacion_B.....	115
Figura 80. Función Matriz_Correlacion_B.....	116
Figura 81. Características de router Archer C7 AC1750.....	118
Figura 82. Configuración del AP en 802.11n.....	120
Figura 83. Configuración del AP en 802.11ac.....	120
Figura 84. Configuración del AP en 2,4 GHz.....	120
Figura 85. Configuración del AP en 5 GHz.....	120
Figura 86. Máximo rendimiento del AP en 2,4 GHz.....	121
Figura 87. Máximo rendimiento del AP en 5 GHz.....	121
Figura 88. Configuración del servidor DHCP en el AP.....	121
Figura 89. Características de la tarjeta Archer T9E AC1750.....	122
Figura 90. Configuración WMM.....	123

Figura 91. Configuración Tecnología XPress (TM)	124
Figura 92. Tendencia de movilidad.....	124
Figura 93. Configuración tasa (802.11b/g)	124
Figura 94. Configuración tasa (802.11a).....	125
Figura 95. Configuración short GI.....	125
Figura 96. Configuración QAM256.....	125
Figura 97. Configuración compatible 40 MHz	125
Figura 98. Configuración modo IBSS.....	126
Figura 99. Configuración compatibilidad AP	126
Figura 100. Configuración consumo de energía	126
Figura 101. Configuración Bandwidth Capability	126
Figura 102. Características de la tarjeta PCIe AC 7260.....	127
Figura 103. Modo HT	128
Figura 104. Topología para las pruebas	130
Figura 105. Simulación 802.11n con un choque.....	133
Figura 106. Simulación 802.11n con dos choques.....	134
Figura 107. Simulación 802.11n con tres choques	134
Figura 108. Simulación 802.11n con cuatro choques	134
Figura 109. Simulación 802.11ac con rango limitado	135
Figura 110. Simulación 802.11ac con rango completado	135
Figura 111. Throughput cliente laptop 802.11n con una línea (escenario 1).....	138
Figura 112. Throughput cliente laptop 802.11n con diez líneas (escenario 2)	138
Figura 113. Throughput cliente desktop 802.11ac con una línea (escenario 3).....	139

Figura 114. Throughput cliente desktop 802.11ac con diez líneas (escenario 4)	139
Figura 115. Throughput cliente laptop 802.11n, servidor URL (escenario 5).....	140
Figura 116. Throughput cliente desktop 802.11ac, servidor URL (escenario 6).....	140
Figura 117. Jitter y pérdidas cliente laptop 802.11n (escenario 7)	140
Figura 118. Jitter y pérdidas cliente desktop 802.11ac (escenario 8)	141
Figura 119. Mapa de calor laptop 802.11n	142
Figura 120. Mapa de calor desktop 802.11n	143
Figura 121. Mapa de calor laptop 802.11ac	143
Figura 122. Mapa de calor desktop 802.11ac	144

RESUMEN

Las redes inalámbricas han proliferado por el estilo de vida actual ya que permiten conectividad de redes locales o internet de forma constante, movilidad, flexibilidad, facilidad de instalación, reducción de costos, escalabilidad, etc. Para que las redes inalámbricas no tengan problemas de compatibilidad, la IEEE estableció el estándar 802.11. Con este estándar se definió el uso del nivel físico y de enlace de datos en la red, especificando normas de funcionamiento. Con esto lo único que diferencia una red inalámbrica de una red cableada es como se transmiten los paquetes de datos. 802.11n es un desarrollo de la nueva generación de Wi-Fi estándar para redes inalámbricas de área amplia. Dispositivos construidos para la especificación 802.11n ofrecerá significativamente mayores niveles de rendimiento que con 802.11b legacy, 802.11a y 802.11g. El estándar 802.11ac, desarrollado entre el 2011 y 2013 y finalmente aprobado en el 2014, es el primer estándar Wi-Fi para proporcionar un rendimiento gigabit, manejando velocidades de transmisión de 1300Mbps y eventualmente a 6,93Gbps. El resultado más evidente son las tasas de transferencia de datos más altas para los usuarios individuales, aunque el mayor beneficio para los administradores de red puede ser la capacidad de manejar un mayor número de dispositivos sin degradaciones inaceptables en el rendimiento.

PALABRAS CLAVE:

- **REDES INALÁMBRICAS**
- **MIMO**
- **FLUJO ESPACIAL**
- **SET DE CODIFICACIÓN Y MODULACIÓN**

ABSTRACT

Wireless networks have proliferated because of the current lifestyle, since they allow constant local network or internet connectivity, mobility, flexibility, easy installation, cost reduction, scalability, etc. In order for wireless networks to have no compatibility problems, the IEEE established the 802.11 standard. This standard defined the use of the physical level and data link in the network, specifying operating rules. With this, the only thing that differentiates a wireless network from a wired network is how data packets are transmitted. 802.11n is a development of the new generation of Wi-Fi standard for wide area wireless networks. Devices built to the 802.11n specification will offer significantly higher levels of performance than with 802.11b legacy, 802.11a and 802.11g. The 802.11ac standard, developed between 2011 and 2013 and finally approved in 2014, is the first Wi-Fi standard to provide gigabit performance, handling transmission speeds of 1300Mbps and eventually 6.93Gbps. The most obvious result is the higher data transfer rates for individual users, although the greatest benefit for network administrators may be the ability to handle a greater number of devices without unacceptable degradation in performance.

KEY WORDS:

- **WIRELESS NETWORKS**
- **MIMO**
- **SPATIAL STREAMS**
- **MODULATION AND CODING SCHEME**

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Introducción

Cuando las computadoras llegan tanto al hogar como a la industria cambia el ritmo de vida del mundo. Estos equipos tienen la capacidad de optimizar procesos, de ser usados como dispositivos de entretenimiento o educación, etc. Apareció un nuevo mercado con un abanico infinito de oportunidades. Se vuelve crítico el manejo de información y la capacidad de compartirlo entre dispositivos, por lo que se crean las redes de computadoras, conectando los equipos físicamente unos con otros a través de cables.

Las redes inalámbricas surgen de la necesidad de equipos móviles que tengan la capacidad de trasladarse en un área determinada conectados a una red. Algunas marcas lanzan al mercado sus productos para este tipo de red, los cuales tienen gran aceptación ya que dan al usuario grandes ventajas, aunque también presentan algunas desventajas. La incompatibilidad entre productos de diferentes fabricantes es de los problemas más críticos que aparecen.

Para dar solución a los diferentes problemas y requerimientos la IEEE forma un grupo que se encargue de dictar los lineamientos para este tipo de redes, y así es como nace la familia de estándares 802.11. Este grupo de estándares definen las normas de funcionamiento para redes inalámbricas dentro de las dos capas inferiores del modelo OSI, la capa física y la capa de enlace de datos. Gracias a los distintos estándares que se encuentran dentro de esta familia, y las mejoras que presentan uno respecto de otro, han permitido evolucionar a las redes inalámbricas, pasando de ser temporales a ser implementadas de forma permanente.

Dentro de esta familia de estándares encontramos los siguientes: 802.11n y 802.11ac. Los estándares antes mencionados serán analizados dentro de este documento, tanto en su parte matemática como funcional, para determinar en qué condiciones pueden funcionar a su máxima capacidad los equipos, tanto emisor como receptor, teniendo en cuenta sus parámetros de funcionamiento, y acorde con lo presentado por parte de los fabricantes de estas tecnologías.

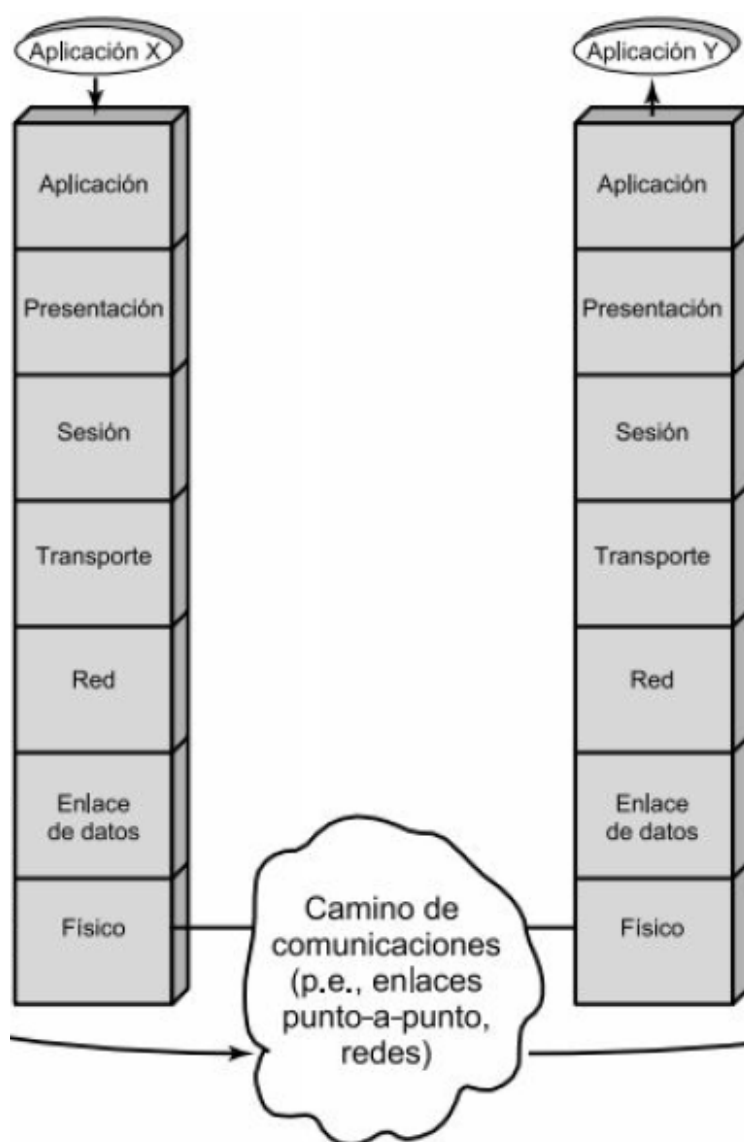


Figura 1. Modelo OSI
Fuente: (Stallings, 2004)

1.2 Modelo OSI

Es un modelo por capas que permite que las funciones de comunicación se distribuyan en el conjunto jerárquico de capas. Cada capa agrupa funciones que son conceptualmente próximas teniendo en cuenta que la capa sea suficientemente pequeña, pero sin definir muchas capas para evitar sobrecarga en el procesamiento. Una capa “n” toma los servicios ofrecidos por la capa “n-1” para poder ofrecer servicios a la capa “n+1”.

Como vemos en la gráfica, el modelo permite la comunicación de la aplicación X con la aplicación Y. No hay comunicación directa entre las capas pares, exceptuando la capa física.

- Capa física. Se encarga de la transmisión y recepción de información binaria a través del medio físico. Establece y termina una conexión en un medio de comunicación. Define:
 - Características eléctricas y físicas de los dispositivos,
 - Relación entre un dispositivo y el medio de transmisión,
 - Voltajes, impedancias de línea, etc.
- Capa de enlace de datos. Ofrece una transferencia sin errores de tramas de datos de un host a otro a través del medio físico. Se divide en dos subcapas, el Control Lógico del Enlace (LLC, Logical Link Control) y el Control de Acceso al Medio (MAC, Logical Link Control).
 - La subcapa de Control Lógico del Enlace establece y mantiene el enlace entre el host emisor y receptor cuando los datos se desplazan por el entorno físico.
 - La subcapa de Control de Acceso al Medio determina la forma en que los host se comunican en la red (como y donde accede al medio físico).

- Capa de red. Controla el funcionamiento de la subred decidiendo la ruta física que deberían tomar los datos dependiendo de las condiciones de la red, calidad de servicio y otros factores. Proporciona:
 - Enrutamiento,
 - Control de tráfico de subred,
 - Fragmentación de trama,
 - Asignación de direcciones lógico-físicas,
 - Cuentas de uso de subred.
- Capa de transporte. Proporciona un servicio orientado a la conexión, en una conexión extremo a extremo. Da un mecanismo para intercambiar datos entre sistemas finales. Determina el tipo de servicio proporcionar a la capa de sesión, el cual se asigna cuando se establece la conexión.
- Capa de sesión. Proporciona mecanismos para controlar el diálogo entre aplicaciones en los sistemas finales. Dependiendo de la aplicación, los servicios de la capa de aplicación pueden ser prescindibles o ineludibles. Proporciona los siguientes servicios:
 - Control del dialogo, comunicación half-duplex o full-duplex,
 - Agrupamiento, el flujo de datos se puede marcar para definir grupos de datos,
 - Recuperación, puede proporcionar un procedimiento de grupos de comprobación.
- Capa de presentación. Define el formato de los datos que se intercambian entre aplicaciones, ofrece a las aplicaciones un conjunto de servicios para transformación de datos, define la sintaxis utilizada entre las entidades de la aplicación.

- Capa de aplicación. Proporciona un medio entre el usuario final y los procesos de aplicación para tener acceso a los servicios de la red. Tiene las siguientes funciones:
 - Uso compartido de recursos y redirección de dispositivos,
 - Acceso a archivos y dispositivos de forma remota,
 - Comunicación entre procesos,
 - Administración de la red,
 - Servicios de directorio,
 - Mensajería electrónica (como correo),
 - Terminales virtuales de red.

1.3 Redes inalámbricas

Las redes inalámbricas aparecieron con las computadoras portátiles, y la necesidad de tener un alto grado de movilidad dentro de un área predeterminada. Para ello dos o más dispositivos se debía conectar por un medio físico específico, el aire. Dichos dispositivos, tanto transmisores como receptores, debían equiparse con transmisores y receptores de onda corta que les permitan comunicarse.

El primer problema con el que se toparon fue la incompatibilidad entre marcas. Para solucionar dicho problema la IEEE estandarizó las LAN inalámbricas mediante el estándar 802.11, del cual hablaremos más adelante. Las redes LAN inalámbricas sirven para la ampliación de las redes LAN, interconexión de edificios, movilidad de equipos, instalación de una red en áreas poco accesibles para cablear, enlaces entre edificios, creación de una nueva LAN o de una LAN temporal, red tipo infraestructura y redes ad-hoc. Los beneficios de este tipo de redes son:

- Movilidad de equipos,
- Flexibilidad,
- Reubicación de equipos sin modificar cableado de la red,
- Crear una nueva red,
- Fácil y rápida instalación,
- Costos,
- Escalabilidad,
- Fácil mantenimiento y detección de fallas.

1.3.1 Conceptos básicos de redes inalámbricas

- Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers). Es la organización profesional técnica más larga del mundo que se dedica al avance tecnológico en beneficio de la humanidad.
- Wi-Fi Alliance. Es la red mundial de compañías que promueve la tecnología Wi-Fi y certifica productos Wi-Fi. Tiene como visión conectar a todos con todo en cualquier lugar.
- Station (STA). Dispositivo final (PC, laptop, smartphone, etc.,) el cual tiene un adaptador de red o un dispositivo embebido el cual provee conectividad wireless.
- Access Point (AP). Dispositivo intermedio el cual funciona como un puente entre las estaciones wireless y la red de backbone existente para acceso a la red.
- Basic Service Set (BSS). Es una red wireless que consiste un único AP soportando uno o más STA. Es también referido como una red wireless en infraestructura.

- **Distribution System (DS).** Es un componente lógico usado para interconectar BSS. Provee servicios de distribución para permitir roaming (itinerancia) de las STA entre BSS.
- **Independent Basic Service Set (IBSS).** Es una red wireless que consiste de al menos dos STA, que se utiliza cuando no se dispone de acceso a un DS.
- **Extended Service Set (ESS).** Conjunto de dos o más AP conectados a la misma red cableada que define un único segmento de red lógico delimitado por un router (subred).
- **Service Set Identifier (SSID).** Es un nombre configurado en el AP (infraestructura) o en el primer cliente wireless (ad hoc) para identificar la red wireless.
- **Celda.** Está compuesta por un transmisor que cubre un área delimitada para proveer cobertura de radio, y encamina las comunicaciones desde y hacia los usuarios.
- **Beacon.** Es una trama que se utiliza para la comunicación inalámbrica la cual posee toda la información de la red.
- **Roaming.** Permite a una STA conectarse a uno u otro AP dependiendo de la calidad de recepción de cada uno, y el enlace físico pasará de una celda a otra según sea necesario, permitiendo a la STA moverse libremente en el área de cobertura sin que el cliente sienta el cambio.
- **Ruido.** Todas las señales presentes en el receptor y que no forman parte del mensaje enviado por el emisor.

1.3.2 Parámetros de una red inalámbrica

- **Velocidad de transmisión.** “Es el parámetro que mide el flujo máximo de bits que pueden transmitirse entre dos equipo de datos en un segundo”. Viene dada en bps.

- Throughput. Es la capacidad de un enlace de transportar información útil; representa a la cantidad de información útil que puede transmitirse por unidad de tiempo. Puede variar en una misma conexión de red, según el protocolo usado para la transmisión y el tipo de datos de tráfico, entre otros factores (Carcele, 2006).
- Frecuencia. Es el valor, en el espectro eletromagnético, en el cual el dispositivo transmite y recibe información La comunicación WiFi utiliza las frecuencias 2,4 GHz y 5 GHz; cada una con sus respectivos canales.
- Ancho de banda. También conocida como Bandwidth (BW), es la diferencia entre un valor de frecuencia superior e inferior en el cual trabaja el dispositivo.

$$BW = f_{max} - f_{min}$$

- Latencia. Es la suma de los retardos en la red. Los retardos están constituidos por el retardo de propagación y el de transmisión (dependiente del tamaño del paquete), el retardo por el procesamiento "store-andforward" (debido a que los switch o router emiten el paquete luego de haber sido recibido completamente en una memoria buffer) y el retardo de procesamiento (necesario para reconocimiento de encabezado, errores, direcciones, etc).
- Jitter. Es un tiempo de latencia variable (fluctuación de retardo) sobre los datos de recepción. Es aceptable si tiene un valor menor o igual a 100 ms.
- Cobertura. Área física que cubre la señal. Puede ser local o de área amplia.
- Disponibilidad. Es el porcentaje de tiempo durante el cual el sistema se encuentra realizando las funciones para las cuales fue diseñado e implementado.
- Potencia de transmisión. "Se define como el nivel de potencia en db en relación a un nivel de referencia establecido en 1 mW". Su unidad es los dBm.

- Relación señal a ruido (SNR, Signal-to-Noise Ratio). Es la relación de potencias entre la señal que se transmite y la señal de ruido que distorsiona la transmisión. Mientras mayor sea su valor es mejor la calidad de la transmisión.

1.3.3 Arquitectura de las redes inalámbricas

La arquitectura contiene varios elementos principales como: estación (STA), punto de acceso wireless (AP), conjunto de servicios básicos (BSS), conjunto de servicios básicos independientes (IBSS), sistema de distribución (DS) y conjunto de servicios extendido (ESS). Algunos de los componentes de la arquitectura representan dispositivos físicos, como las STA y los AP.

La arquitectura, en su forma más básica, está compuesta de un gestor de comunicación y una serie de clientes. Los clientes escucharán siempre para detectar la presencia de uno o más gestores, los cuales proporcionan el SSID, canal que usan, seguridad, algoritmos de autenticación, etc.

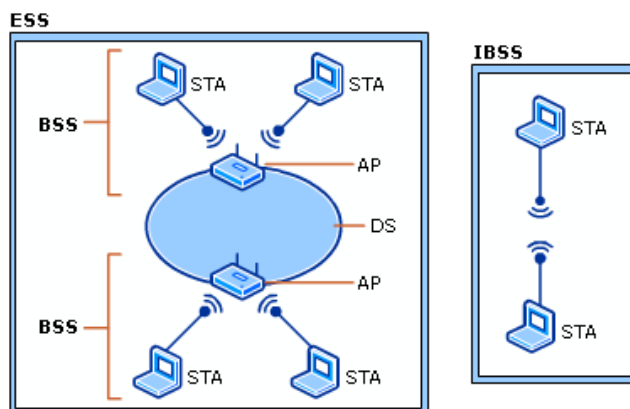


Figura 2. Arquitectura de redes inalámbricas
Fuente: (Aguilar, 2015)

1.3.4 Modos de operación de las redes inalámbricas

Se tiene dos modos de operación: modo infraestructura y modo Ad Hoc. En ambos casos el SSID identifica la red wireless.

- Modo Ad Hoc. Es también llamado modo peer-to-peer. Las STAs se comunican directamente unas con otras sin usar un AP, conformando una celda o un IBSS. Jerárquicamente no existe diferencia entre las STAs. En un inicio una STA tiene que realizar las funciones de un AP. Esta STA se encarga del proceso periódico del envío de tramas beacon y la autenticación de nuevos miembros. Esta STA no actúa como un puente para transmitir información entre las STAs de la celda. Puede haber un máximo de nueve miembros dentro de la celda.

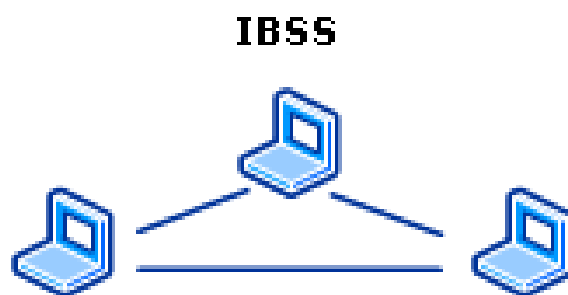


Figura 3. STAs en modo Ad Hoc

Fuente: (Aguilar, 2015)

- Modo infraestructura. Hay al menos un AP y una STA. La STA usa el AP para acceder a los recursos de una red cableada. La red cableada puede ser una intranet o el internet, dependiendo de la ubicación del AP en la topología de la red. También permite crear varias celdas, las cuales trabajarán conjuntamente y darán mayor cobertura.

El AP envía periódicamente tramas beacon con toda la información de la red, permitiendo así a las STAs conocer los distintos puntos de acceso a las redes disponibles. Si se tiene varios BSS dentro de un DS, las STAs tienen la capacidad de desplazarse entre BSS sin perder conectividad debido al proceso de roaming y al envío periódico de tramas. En la figura 5 se muestra el proceso de roaming al pasar un STA de un BSS a otro: a) cada STA se encuentra en un BSS con buena cobertura y si detectar ninguna otra celda; b) un STA entra en la zona donde se solapan ambos BSS, recibe tramas beacon de ambos AP, comprueba que se trata de la misma red, y evalúa la calidad de recepción de los BSSs; c) continúa desplazándose la STA hasta que la calidad de recepción de BSS al que pasa es mejor, y se asocia al AP de este.

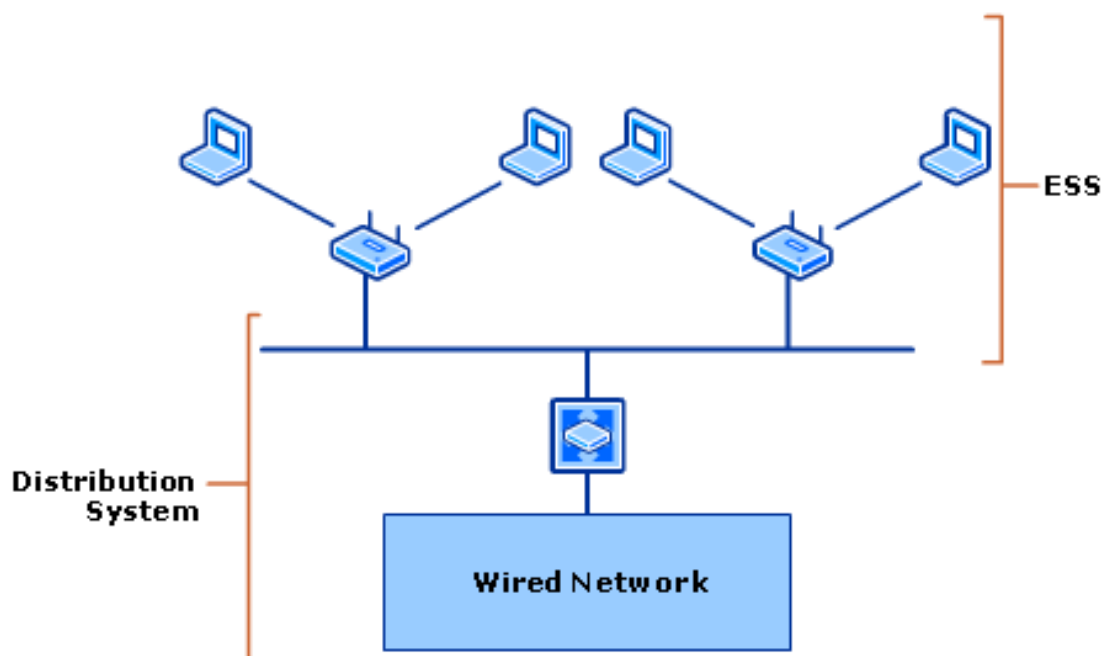


Figura 4. Modo infraestructura
Fuente: (Aguilar, 2015)

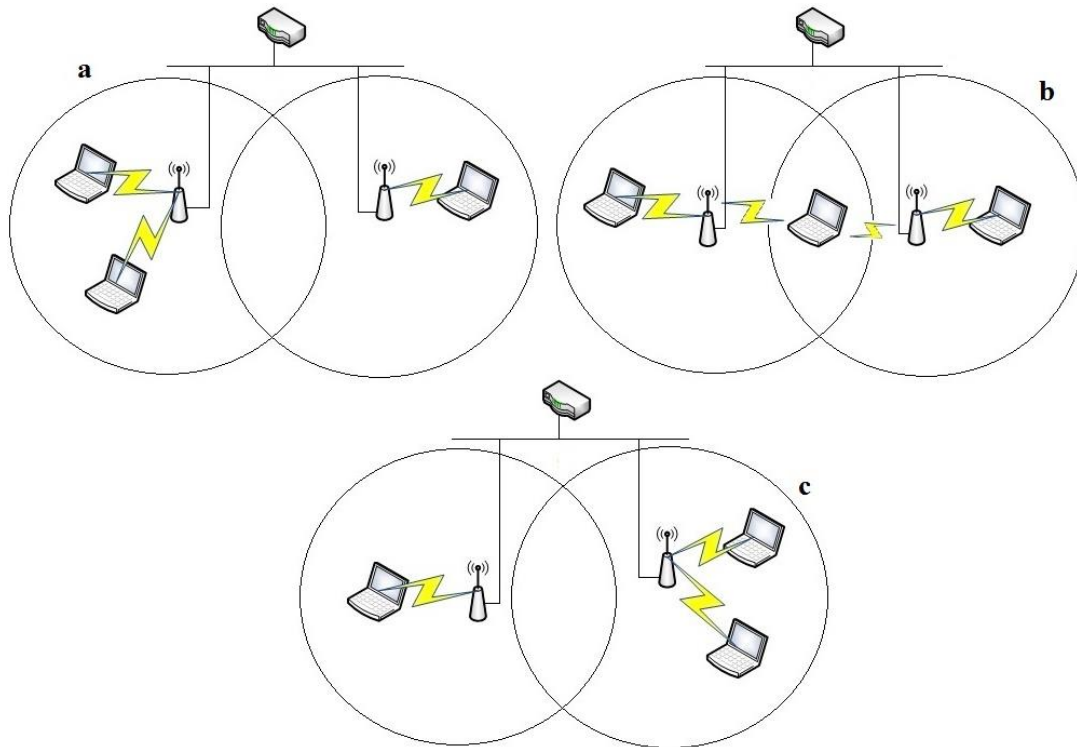


Figura 5. Proceso de roaming

1.3.5 Seguridades en una red inalámbrica

Las redes wifi son muy sensibles a la captura de tráfico debido al medio que manejan, por lo que se encripta la información. Los protocolos de encriptación requieren cada vez más recursos de los equipos que los implementan, debido a que cada solución de seguridad debe estar de acuerdo al rendimiento de la red. Los protocolos para este fin son WEP, WPA y WPA2.

- Wired Equivalent Privacy (WEP, Privacidad Equivalente al Cableado). Provee servicios de confidencialidad de datos mediante la encriptación de los datos enviados entre los APs. Un trama 802.11 encriptada con WEP tiene la bandera de WEP activada en la cabecera MAC. WEP incluye un valor de comprobación de integridad (ICV, Integrity Check Value) en la parte encriptada de la trama inalámbrica. WEP define dos claves compartidas:

- Multicast/global key. Es una llave de encriptación que protege tráfico broadcast y multicast desde el AP hacia las STAs.
- Unicast sesión key. Es una llave de encriptación que protege tráfico unicast entre las STAs y el AP, y tráfico multicast y broadcast enviado por las STAs hacia el AP.

El principal problema que presenta WEP es que la determinación y distribución de las llaves de encriptación no está definida. Las llaves deben ser distribuidas por un canal seguro fuera del estándar 802.11. También no está definido un mecanismo de cambio de las llaves encriptadas, ya sea por autenticación o periódicamente. Todos los APs y STAs usan la misma llave WEP configurada para múltiples sesiones, lo cual produce una gran cantidad de tráfico. Dicho tráfico puede ser capturado por un atacante, y utilizando métodos de criptoanálisis puede determinar la clave WEP.

La falta de un protocolo de gestión de llaves WEP es la principal limitación para proveer seguridad en 802.11, en especial en el cuándo hay un gran número de APs modo infraestructura. El modo Ad Hoc también es afectado por la falta de autenticación automática y servicio de determinación de clave, en el que los usuarios desearían usar la comunicación peer-to-peer en áreas como salas de conferencias.

- Wi-Fi Protected Access (WPA, Acceso Protegido Wi-Fi). Fue desarrollado por la Wi-Fi Alliance en respuesta a los fallos de seguridad detectados en WEP. Los principales avances que presenta son los siguientes:
 - Proporciona una red inalámbrica segura.
 - Mediante una actualización de software da solución a los problemas de WEP.

- Provee una solución de red inalámbrica segura para STAs SOHO (Small Office/Home Office).
- Es compatible con 802.11i.

WPA contiene mejoras o sustituciones a las siguientes características de seguridad: autenticación, encriptación e integridad de datos.

- Autenticación. Con WPA, la autenticación 802.1x es requerida. La autenticación con WPA es una combinación de un sistema abierto y la autenticación 802.1x. Tiene las siguientes fases:
 - La primera fase usa la autenticación del sistema abierto para indicar que la STA puede recibir tramas del AP.
 - La segunda fase usa 802.1x para realizar autenticación a nivel de usuario. Para ambientes sin infraestructura RADIUS, WPA soporta el uso de llaves pre-shared. Para ambientes con infraestructura RADIUS, WPA soporta EAP y RADIUS.
- Encriptación. La regeneración de claves para claves de encriptación globales y unicast es requerido. El TKIP cambia la clave de encriptación unicast para cada trama, y cada cambio es sincronizado entre la STA y el AP. Para llaves de encriptación multicast/globales, WPA incluye un servicio en el AP para advertir de los cambios a las STAs conectadas.
 - Temporal Key Integrity Protocol (TKIP, Protocolo de Integridad de Clave Temporal). En WPA, el uso de TKIP es requerido. Proporciona las siguientes características:

- Verificación de la configuración de seguridad después de que las llaves de encriptación se determinan.
- Cambio sincronizado para la clave de encriptación unicast de cada trama.
- Determinación de una clave de encriptación unicast de arranque única para cada llave de autenticación pre-shared.
- Advanced Encryption Standard (AES, Estandar de Encriptación Avanzado). WPA la define como una opción de reemplazo para la encriptación WEP. El soporte AES en adaptadores de red inalámbricos y APs puede no ser requerido, debido a que la actualización de firmware para que soporte AES el dispositivo no exista.
- Integridad de datos. En WPA, un método conocido como Michael especifica un nuevo algoritmo que calcula un Message Integrity Code (MIC) de 8 bytes con las características de cálculo disponibles en el hardware inalámbrico existente. El MIC está ubicado entre una parte de la data de la trama 802.11 y el ICV de 4 bytes. Michael también proporciona protección contra repeticiones mediante el uso de un contador de tramas en la cabecera MAC.
- WPA2. Es el nombre comercial del estándar 802.11i. Usa un algoritmo AES con clave de 128 bits, por lo que se diseñó un hardware nuevo que soporte el algoritmo. Tiene un nuevo sistema de integridad, el CCMP.
 - Counter-Mode / Cipher Block Chaining Message Authentication Code Protocol (CCMP). Está basado en la suite de cifrado de bloques AES en su modo de operación

CCM. Es un protocolo de seguridad de tráfico unicast y multicast que tiene las siguientes características:

- soporta confidencialidad e integridad de datos RSNA,
- usa una clave única para encriptación y autenticación,
- cubre datos no encriptados debido a la autenticación.

Es soportado en redes ad hoc, compatible con WPA, gestiona dos tipos de claves:

- Pairwise Key Hierarchy (PKH). Va del AP a la STA. Se utiliza en la comunicación punto a punto.
- Group Key Hierarchy (GKH). Realiza una comunicación broadcast desde el AP hacia todas las STAs.

CAPÍTULO II

ESTÁNDARES WLAN

2.1 IEEE 802.11

Con el apareamiento de los equipos portátiles se creó la necesidad de movilidad de los equipos dentro de un área definida sin perder la conexión a la red. Para ello se equiparon los equipos portátiles y las oficinas con transmisores y receptores de onda corta que permitan la comunicación. Varias empresas comenzaron a comercializar sus soluciones, pero apareció un gran problema, la incompatibilidad entre marcas. Para solucionar este inconveniente la industria decidió crear un estándar para LANs inalámbricas, y se encargó dicha tarea a un comité de la IEEE. El resultado fue el estándar 802.11. Cabe recalcar que el estándar es compatible con Ethernet sobre la capa de enlace de datos.

2.2 802.11b

Hace uso de la banda de 2,4 GHz. Trabaja en 14 canales, con un ancho de canal de 83,5 MHz. Maneja el mismo protocolo de señalización que Ethernet. La información es menos susceptible a corromperse por interferencia o atenuación de la señal debido a que utiliza métodos de codificación menos complejos y más redundantes. Utiliza modulación por código complementario (CCK). Trabaja con velocidades de 1, 2, 5,5 y 11 Mbps dependiendo de la calidad de la señal.

2.3 802.11a

Hace uso de la banda de 5 GHz. Trabaja con 23 canales, con un ancho de banda de 555MHz (5150-5350 MHz, 5470-5825 MHz). Usa multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM). Puede trabajar con velocidades de 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 y 54 Mbps. Utiliza hasta 52 subportadoras que se modulan usando BPSK, QPSK, QAM-16 y QAM-64, dependiendo de la velocidad requerida. Tiene 12 canales sin solapar.

2.4 802.11g

Hace uso de la banda de 2,4 GHz. Trabaja con 14 canales, con un ancho de banda de 83,5 MHz. Puede trabajar con velocidades de 54, 48, 36, 24, 12, 9 y 6 Mbps. Cuando un cliente 802.11b se conecta a un nodo 802.11g, la velocidad de transmisión de datos disminuye para todos los dispositivos conectados al nodo, aunque proporciona una alta velocidad de datos, aunque no al mismo tiempo. Los detalles de interoperabilidad entre “b” y “g” ocuparon un proceso técnico el cual se verá a continuación.

2.5 Compatibilidad internacional y canales entre 802.11b y 802.11g

Para 2,4 GHz, los estándares 802.11b y 802.11g, dividen el espectro de frecuencias en 14 canales consecutivos superpuestos, cuyas frecuencias centrales tienen una separación del 22 MHz. Los canales 1, 6, 11 y 14 (disponible solo para 802.11 b) no se superponen, por lo que pueden operar redes en cada uno de estos canales sin interferir entre sí. Ambos estándares especifican la frecuencia central de canal y una máscara espectral de dicho canal. La máscara espectral para

802.11b requiere una señal de por lo menos 30 dB por debajo del pico de energía a ± 11 MHz de la frecuencia central, y por lo menos 50 dB por debajo del pico de energía a ± 22 MHz de la frecuencia central. 802.11g utiliza la misma máscara espectral.

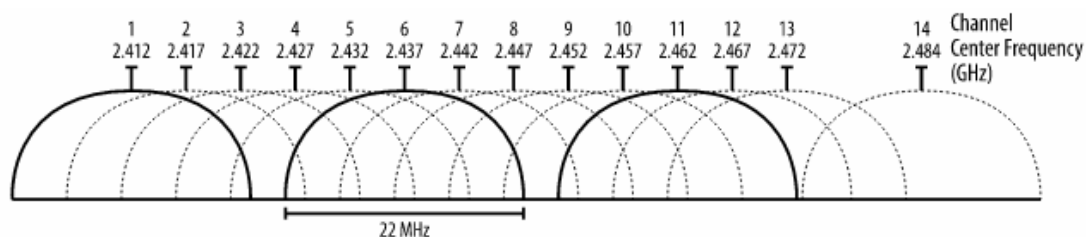


Figura 6. Canales en la banda de 2,4 GHz

Fuente: (Grigorik, 2013)

2.6 802.11n

Opera tanto en la banda de 2,4 GHz como en 5 GHz, lo que conlleva un incremento del consumo eléctrico comparado con los estándares anteriores. El objetivo principal del estándar era aumentar el throughput por lo menos a 100 Mbps. En los estándares previos se consideraba que mejorar el throughput era tarea casi exclusiva de la capa física. Prácticamente las mejoras que presenta el estándar permiten aumentar “la velocidad” a la cual se envía información, y “ampliar” el canal por el cual se envía la información, lo cual el usuario final lo percibe como “tener una mejor conexión”. Las mejoras que se realizaron en 802.11n son en la capa física y en la capa de enlace de datos. En la capa de enlace de datos se trabajó específicamente en la subcapa de Control de Acceso al Medio (MAC, Media Access Control). Las mejoras que se realizaron en ambas capas se presentan a continuación.

2.6.1 Capa física

A nivel de la capa física, los cambios que existen respecto a los otros estándares son: modulación, manejo de tecnología MIMO, aumento en el ancho de banda del canal, reducción de cabeceras, set de codificación y modulación, codificación, convergencia y el proceso de transmisión y recepción.

2.6.1.1 MIMO

Representa el fenómeno físico clave para alcanzar velocidades de hasta 600 Mbps. Es una técnica que trabaja con múltiples entradas y múltiples salidas (más de una antena tanto en el emisor como en el receptor) lo cual permite trabajar con varios canales a la vez. Visto de otra forma, MIMO es una técnica que usa múltiples señales que viajan simultáneamente y a la misma frecuencia a través de un canal, aprovecha la propagación multicamino para incrementar la eficiencia espectral del sistema, incrementando la tasa de transmisión, aumentando la relación señal a ruido (SNR) lo que produce una mayor robustez en la transmisión. Antes de ver el tema a profundidad se deben tratar previamente varios antecedentes.

2.6.1.1.1 Antecedentes

- **Diversidad.** El término hace referencia a un escenario en el cual existe al menos una copia de la señal transmitida. Existen de las siguientes clases: diversidad en tiempo, diversidad en frecuencia, diversidad en el espacio, diversidad de polarización y diversidad de usuarios.

Para el caso interesa únicamente la diversidad en el espacio, a través de la diversidad de antenas. Según el número de antenas existen los siguientes sistemas:

- SISO (Single Input, Single Output). Sistema conformado por una antena transmisora y una antena receptora.
- MISO (Multiple Input, Single Output). Sistema conformado por varias antenas transmisoras y una sola antena receptora.
- SIMO (Single Input, Multiple Output). Sistema conformado por una sola antena transmisora y varias antenas receptoras.
- MIMO (Multiple Input, Multiple Output). Sistema conformado por varias antenas transmisoras y varias antenas receptoras.

Pero, ¿comparando la diversidad del resto de escenarios con el de MIMO, que lo hace diferente, además del número de antenas? La diferencia radica en el chip de radio y en el transceptor que presenta cada uno de estos. Transceptor o transeiver es el dispositivo o módulo que permite la transmisión o recepción de la señal, pero no al mismo tiempo. Es decir, es semi-duplex.

En diversidad de antenas existe un transceptor, el cual puede estar alimentado por varias antenas, pero solo una conectada al mismo. Cuando el AP hace de receptor, normalmente se elige la antena que recibió la señal con mayor potencia para conectarse a la cadena de recepción. Cuando el AP hace de transmisor, debe seleccionar una sola antena para su uso, normalmente la “primaria”. En diversidad de antenas existe un solo transmisor o receptor, pero elige la “mejor” antena, teniendo en cuenta que pueden ubicarse a una distancia precisa entre sí, ya que debido a la interferencia de trayectos múltiples una estará en un “punto frío” y otra en un “punto caliente”.

En MIMO cada antena es independiente, es decir, una antena puede transmitir o recibir un conjunto de información totalmente diferente al del resto. Teniendo en cuenta el número de antenas en el transmisor y el receptor, el rendimiento de la comunicación es directamente proporcional al menor número de antenas que se tiene. Básicamente, diversidad de antenas elige el mejor camino entre dos dispositivos, mientras que MIMO utiliza todas las rutas disponibles.

- Smart Antenna. El término hace referencia a un arreglo de antenas espacialmente distribuidas, el cual maneja algoritmos para el tratamiento digital de señales. Aparentemente MIMO y Smart Antenna hacen referencia a lo mismo, pero presentan diferencias. La primera diferencia radica en el comportamiento frente a los multitrayectos. Smart Antenna asume que los multitrayectos son perjudiciales para la comunicación y trata de minimizar su efecto. En cambio, MIMO aprovecha los multitrayectos para incrementar el throughput, alcance y fiabilidad de la comunicación. La segunda diferencia radica en la multidimensionalidad. Multidimensional hace referencia al envío de varias señales de forma simultánea y por el mismo canal. MIMO es un sistema multidimensional. A continuación se ilustra cada escenario.

La figura 7 muestra un sistema MISO que utiliza beamforming (mejor camino). La figura 8 muestra un sistema SIMO. La figura 9 muestra un escenario con Smart Antenna, el cual utiliza diversidad de antenas y beamforming. Se envía una sola señal por el canal, lo cual se conoce como un sistema unidimensional. El envío de la misma señal mediante varias antenas no representa un incremento en el throughput o en la capacidad del sistema.

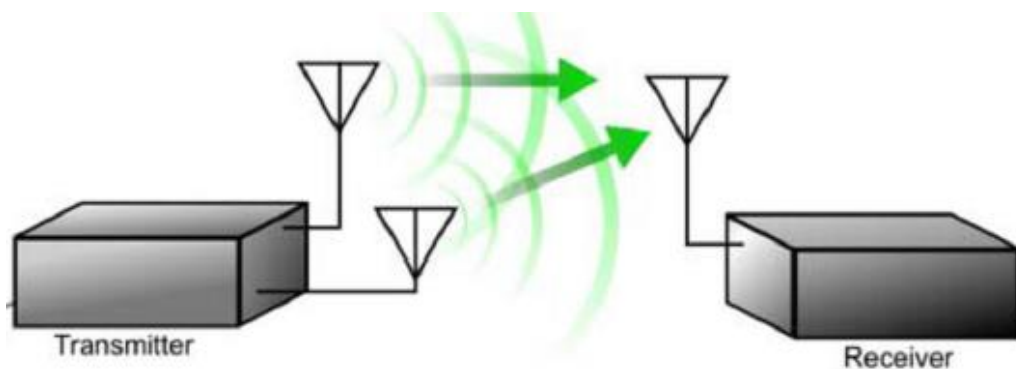


Figura 7. Sistema MISO: diversidad de antenas (transmisor) y beamforming
Fuente: (Anguís Horno, 2008)

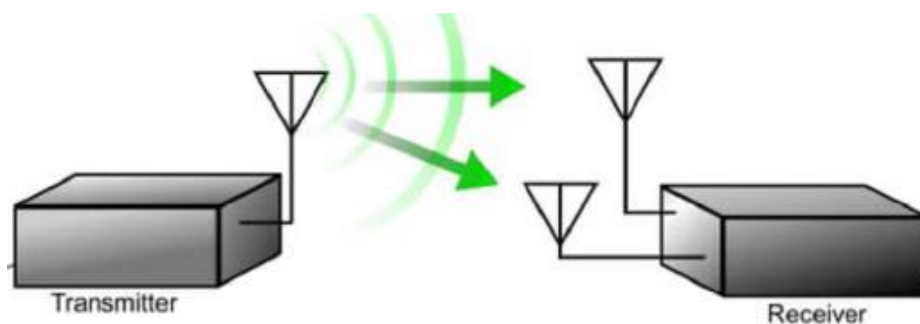


Figura 8. Sistema SIMO: diversidad de antenas (receptor)
Fuente: (Anguís Horno, 2008)

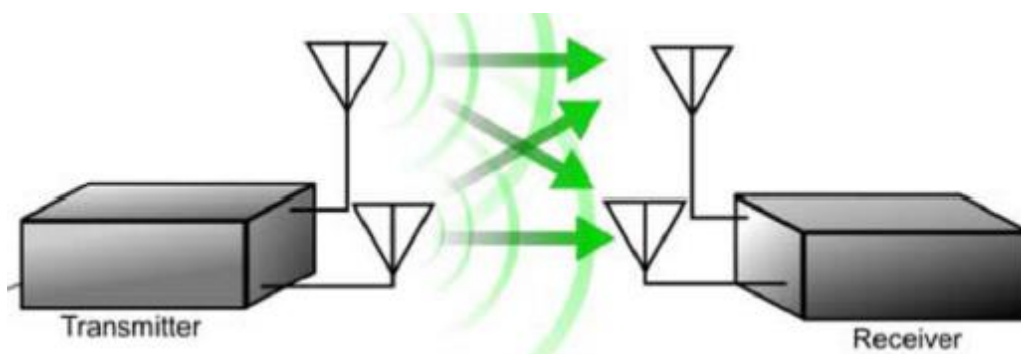


Figura 9. Típico sistema Smart Antenna
Fuente: (Anguís Horno, 2008)

En cambio, MIMO envía varias señales en forma simultánea a través de un solo canal, lo cual se conoce como un sistema multidimensional. Dicho sistema se lo observa en la figura 10. Este sistema multiplica la eficiencia espectral y aumenta el throughput.

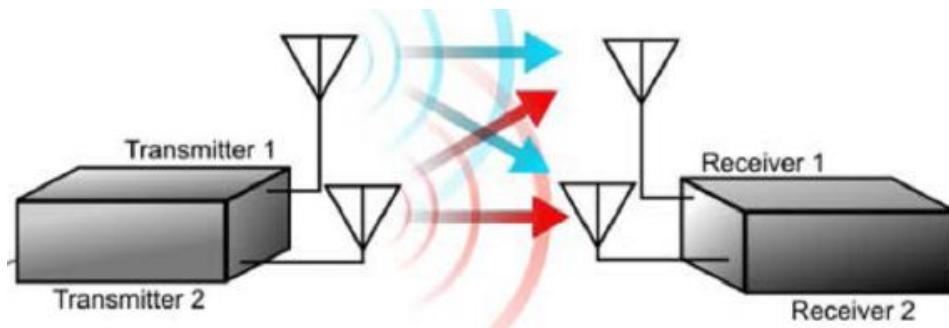


Figura 10. Sistema MIMO
Fuente: (Anguís Horno, 2008)

2.6.1.1.2 Técnicas de transmisión de MIMO

Se las puede dividir o agrupar en 3 categorías: diversidad de antenas, multiplexación espacial y beamforming.

2.6.1.1.2.1 Diversidad de antenas

Como se mencionó antes, MIMO usa la diversidad espacial para mejorar el sistema a través de la diversidad de antenas. Dependiendo del extremo de la transmisión se puede hablar de diversidad en recepción o diversidad en transmisión.

- Diversidad en recepción. Es un sistema que usa dos o más antenas en el receptor para generar recepciones independientes de la señal. Las antenas están espacialmente distribuidas. Se divide en tres categorías:
 - Diversidad por selección. Funciona en base a un criterio: señal de mayor potencia, señal con mejor SNR, etc.

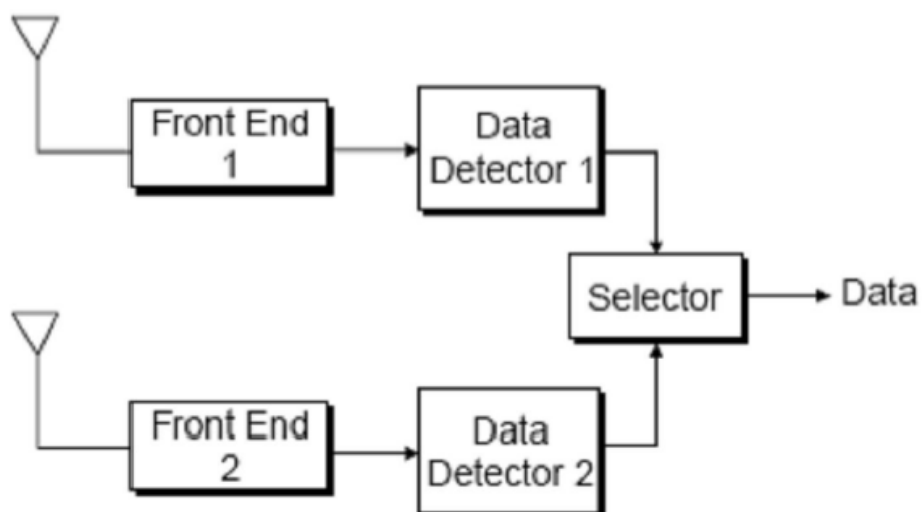


Figura 11. Esquema de un receptor que usa diversidad por selección

Fuente: (Anguís Horno, 2008)

- Diversidad por conmutación. Dependiendo un valor umbral cambia la antena de recepción.

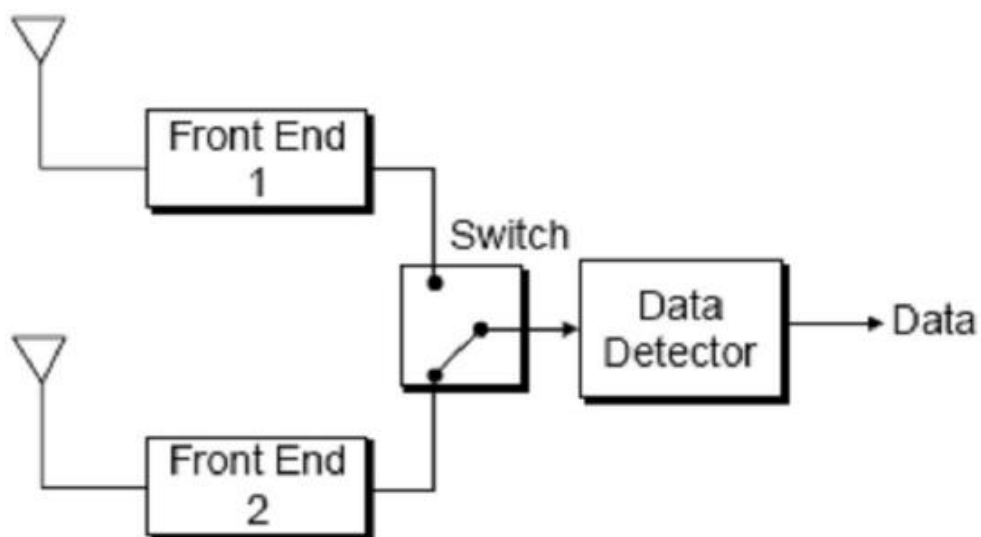


Figura 12. Esquema de un receptor que usa diversidad por conmutación

Fuente: (Anguís Horno, 2008)

- Diversidad por combinación. Combina linealmente todas las señales recibidas.

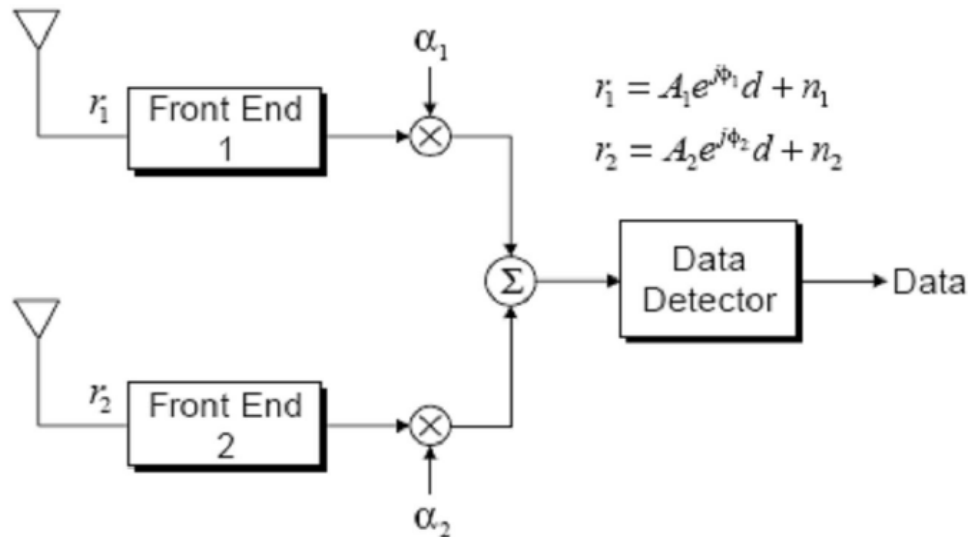


Figura 13. Esquema de un receptor que usa diversidad por combinación
 Fuente: (Anguís Horno, 2008)

- Diversidad de transmisión. Es un sistema que usa dos o más antenas en el transmisor. Las antenas están espacialmente distribuidas. Se divide en cuatro categorías: con cambio de antena, con ponderado de frecuencia, a través de diversidad de retraso y a través de diversidad de código. MIMO usa la diversidad de código. Diversidad de código (STC, Space-Time Coding). Método que emplea diversidad de transmisión para mejorar la comunicación. Se principio es el siguiente: transmite varios copias redundantes de una trama de datos codificada con el fin que al menos una llegue en buen estado para ser decodificada. Estas copias son distribuidas en todas las antenas del transmisor. La figura 14 muestra un codificador espacio-tiempo, el cual transmite simultáneamente una constelación diferente por cada antena.

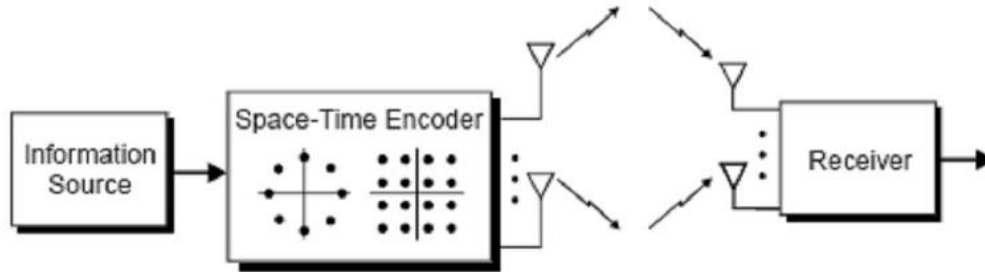


Figura 14. Diagrama de bloques de un transmisor con diversidad de código
Fuente: (Anguís Horno, 2008)

Hay dos tipos de diversidad de código:

- Space-Time Trellis Coding (STTC). Las copias son codificadas a través de un código convolucional, el cual permite ganancia de codificación y de diversidad. Es complejo de implementar.
- Space-Time Block Coding (STBC). Las copias son codificadas como un solo bloque, lo cual permite ganancia en diversidad. Menos complejo de implementar.

2.6.1.1.2.2 Multiplexación espacial

También conocida como Spatial Multiplexing (SM), combina varias señales en una sola señal, la cual tiene mayor ancho de banda, eso en el receptor. En el transmisor se divide una señal en varias señales de menor ancho de banda (se demultiplexa la señal), las cuales son enviadas de forma simultánea y a través del mismo canal. Lo antes mencionado se lo puede observar en la figura 15.

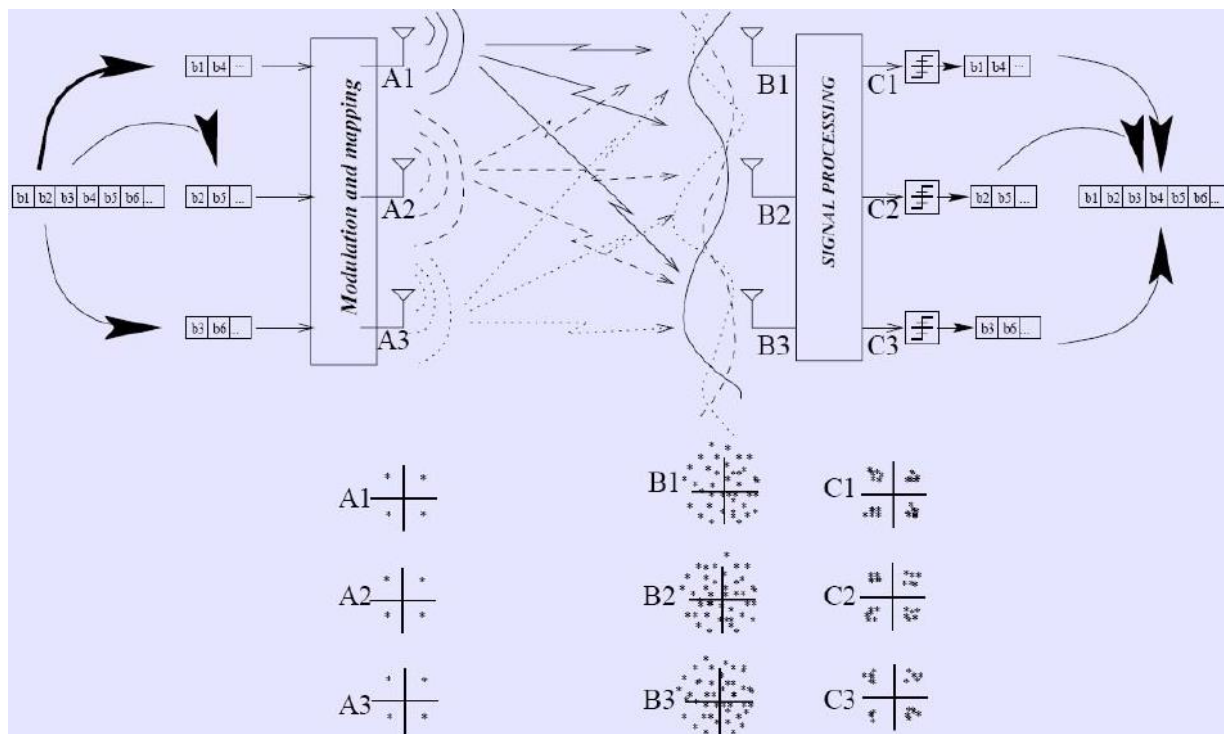


Figura 15. Multiplexación y demultiplexación espacial

Fuente: (Anguís Horno, 2008)

El orden de la multiplexación es el número de flujos de datos transmitidos de forma simultánea. Su valor es el menor número de antenas del transmisor o del receptor.

2.6.1.1.2.3 Beamforming

Beamforming permite que un arreglo de antenas enfoque toda su energía en la dirección de una STA, o en otras palabras, permite controlar el patrón de radiación de las antenas, tanto del transmisor como del receptor. En recepción, beamforming permite cambiar la sensibilidad del receptor en una dirección específica. En transmisión, configura el patrón de radiación de la antena. Precoding es un caso especial de beamforming para transmisiones multidimensionales, el cual hace referencia a todas las técnicas de procesamiento espacial que se realizan en un transmisor MIMO.

Beamforming aumenta la SNR en el receptor sin aumentar la potencia, lo cual permite utilizar una codificación más agresiva, obteniendo un throughput más alto. La figura 16 muestra la idea básica de la formación de haces. Un transmisor, llamada también “beamformer”, enfoca o dirige la energía de modo que tiende a ir en una dirección, hacia el receptor, llamado también “beamformee”. De igual forma se puede observar el patrón de cobertura que se genera.

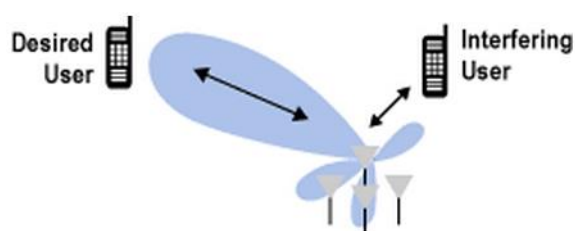


Figura 16. Tecnología beamforming
Fuente: (Gast, 802.11n: A Survival Guide, 2012)

La dirección del haz es controlada a través de desplazamientos de fase en el sistema de la antena, lo cual implica un chip avanzado para el procesamiento de la señal. Una ventaja de la polarización de la transmisión en una dirección es que tiene una sensibilidad relativamente baja en la dirección opuesta. En otras palabras, las fuentes de interferencia de otras direcciones son rechazadas por la antena.

Gracias a la formación de un haz en una dirección, la transmisión del AP hacia la STA obtiene potencia adicional. Una desventaja es que los beneficios antes mencionados se aplican a un solo receptor. Esto es debido a que 802.11 no ejerce un control estricto sobre la sincronización de la transmisión. En otras palabras, un AP que utiliza beamforming generalmente recibe peticiones sin ninguna dirección, lo cual los limita a usar un arreglo de antenas como receptores omnidireccionales, lo cual produce enlaces asimétricos, con potencial interferencia de nodos ocultos. Para eliminar asimetría en el enlace y reducir efectos negativos, el AP debe ser más

sensible en la recepción, con lo que se compensa la ganancia de la antena que recibe menor potencia.

Para formar un haz se toma las señales de radio que se van a transmitir y se les aplica una transformación matemática, la cual cambia la forma mediante la cual se van a transmitir. Matemáticamente, la transformación se representa mediante una matriz que toma una señal entrante prebeamforming y la mapea con las salidas. Dicha matriz se conoce como matriz de dirección. Con un chip beamforming, la matriz de dirección tiene las dimensiones del número de flujos, que son las entradas, y el número de cadenas de transmisión. En un sistema de tres flujos con tres salidas, la matriz es un cuadrado que mapea alguna combinación de las entradas a cada una de las salidas. En el diagrama de bloques del transmisor de 802.11n, el mapeador espacial utiliza la matriz de dirección para tener alcances más largos. De forma general, beamforming viene ejecuta de dos formas: implícito y explícito.

- Explícito. Antes de transmitir, un dispositivo mide el canal activamente, y dicha medición se usa para calcular la matriz de dirección. La medición del canal se logra a través del envío de una trama de sondeo hacia el receptor, el cual responde con una trama que indica cómo se recibió la trama de sondeo. Comparando el contenido de ambas tramas el transmisor calcula la matriz de dirección. La desventaja del beamforming explícito es que requiere soporte de ambos extremos de la comunicación.
- Implícito. La mayoría de dispositivos 802.11n que soportan beamforming lo hacen de manera implícita. No se utiliza ningún intercambio de tramas que se dedique a la formación de enlaces. Lo que hacen los dispositivos es estimar la matriz beamforming a partir de frames recibidos o por interferencia de los frames que se han recibido. Se usan ACK o datos transmitidos en los canales piloto para estimar la matriz. Estos dispositivos no proporcionan

un nivel alto de rendimiento. Puede ser implementada por un solo extremo del enlace. Todo esto hace que sea más común. En la Tabla 1 se muestra la comparación entre ambas tecnologías.

Tabla 1

Comparación de tecnologías beamforming

Attribute	Implicit	Explicit
802.11 PHY support	802.11a, b, g, n	802.11n only
Client requirement	None	Send channel measurements to AP
Link adaptation	Open loop	Closed loop
Feedback source	Cliente uplink frames	Cliente channel measurements
Performance gain	Modest gain, generally increasing with the number of antenna elements	Higher gain
Implementation location	Software/firmware built into antenna system or layered on top of radio chip	Special features within 802.11n radio interface
Number of implementations	Common	Rare

Fuente: (Gast, 802.11n: A Survival Guide, 2012)

2.6.1.1.3 Flujo espacial

Anteriormente se definió que MIMO transmite múltiples señales, múltiples flujos de datos a través del mismo canal. A cada flujo de datos se lo denomina flujo espacial porque es un camino separado a través del espacio entre pares de comunicación. Los flujos espaciales se crean al tener múltiples rutas entre dos dispositivos, independientes unas de otras, a través del espacio. Debido a que las trayectorias no interfieren entre sí, se pueden enviar flujos independientes a través de cada ruta, aumentando el rendimiento.

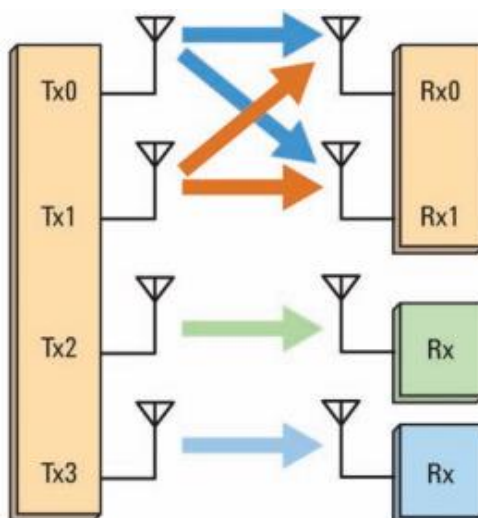


Figura 17. MIMO multiusuario (4 flujos, 3 usuarios)

Fuente: (Gast, 802.11n: A Survival Guide, 2012)

802.11n utiliza la estructura de canales y técnicas de modulación de 802.11a/g, por lo que se puede decir que cada sistema MIMO 802.11n es aproximadamente equivalente a una sola transmisión 802.11 a/g pero duplicada, triplicada o cuadruplicada. 802.11n admite hasta 4 flujos espaciales. Un parámetro para observar el beneficio de usar flujos espaciales es la eficiencia espectral. Debido a que 802.11n tiene dos anchos de canal, hay una entrada para cada ancho de canal.

Tabla 2

Comparación de la eficiencia espectral

802.11 PHY	Spectral Efficiency (Mbps/MHz)
802.11 direct sequence/802.11 frequency hopping	0,09
802.11b	0,5
802.11a/g	2,7
802.11n (20 MHz channels, MCS 15)	6,5
802.11n (40 MHz channels, MCS 15)	6,75

Fuente: (Gast, 802.11n: A Survival Guide, 2012)

En la Tabla 2 se compara las capas físicas de 802.11 en términos de la eficiencia espectral, la cual se define como el número de bits que se puede enviar por unidad de espectro. Una mayor eficiencia espectral es mejor.

2.6.1.1.4 Cadenas de radio

Entre el sistema operativo y la antena se tiene una interfaz 802.11, la cual realiza varias tareas y tiene varios componentes conectados entre sí, lo cual se conoce como cadena de radio. En el transmisor, cuando se transmite una trama, las tareas principales son dos: la transformada de Fourier inversa para convertir una señal en el dominio de la frecuencia en una señal en el dominio del tiempo; y la amplificación de la señal antes que llegue a la antena para que tenga un alcance de acuerdo al estándar. En el receptor se realiza el proceso inverso. Una vez que la señal llega a la antena las tareas que se realizan son: la amplificación de la señal recibida, la cual debe tener características suficientes para poder trabajar; y realizar la transformada de Fourier para extraer las subportadoras.

Generalmente un AP tiene componentes de mayor calidad en interfaz de radio, lo cual le permite una mayor cobertura comparándolo con una STA. Para asegurar que el rendimiento de la transmisión y recepción estén estrechamente ligados se debe cumplir una condición de enlace simétrico, lo cual empareja los amplificadores de transmisión y recepción. Tanto transmisor como receptor deben tener las mismas capacidades de potencia y ganancia. Al tener la capacidad 802.11n de transmitir múltiples flujos espaciales se requieren múltiples cadenas de radio. Cada flujo espacial debe ser procesado por sus propios componentes individuales. La figura 18 muestra un diagrama de bloques simplificado para la interfaz 802.11n con cuatro cadenas de radio.

Aunque varias cadenas de radio aumentan dramáticamente el throughput, también se presenta como una desventaja. Al ser las transformadas de Fourier matemáticas complejas, estas utilizan mucha energía. De igual forma utilizan una gran cantidad de energía los amplificadores. Al tomar muestras del canal los receptores, la potencia requerida y el ancho del canal dependen del número de flujos espaciales. Por lo tanto, todo el hardware de 802.11n está basado en componentes con gran consumo de energía.

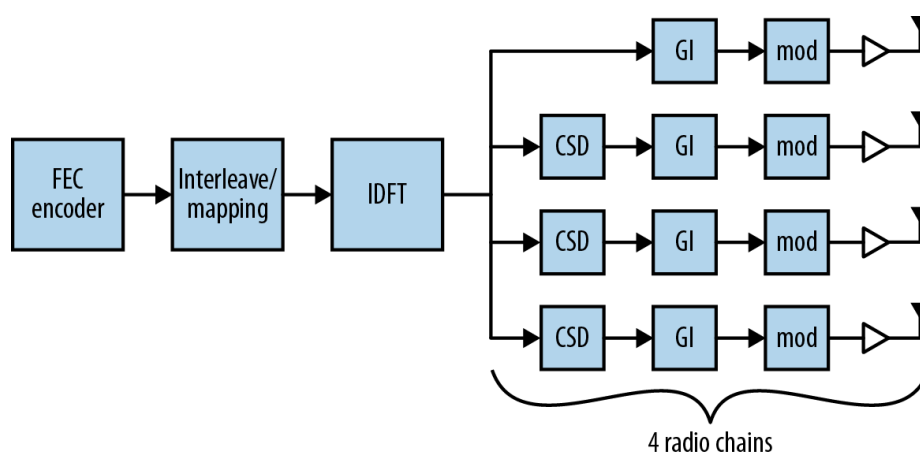


Figura 18. Diagrama de bloques de una interfaz 802.11n de 4x4
Fuente: (Gast, 802.11n: A Survival Guide, 2012)

Las cadenas de radio y los flujos espaciales están relacionados directamente. Si bien es cierto, un flujo espacial tiene un transmisor y un receptor independientes, el número de cadenas de radio debe ser mayor o igual al número de flujos espaciales. Los dispositivos pueden negociar el número de flujos utilizados, y los mismos encontrarán la velocidad más alta que se puede utilizar. Una característica de 802.11n es Space-Time Block Coding (STBC), la cual utiliza dos cadenas de radio para un flujo espacial. Esta característica permite aumentar la redundancia para compensar pérdidas en el trayecto, aunque sacrifica la velocidad global de la transmisión.

Aún sin STBC, las cadenas de radio extra ofrecen un beneficio. Algunos dispositivos implementan Maximal Ratio Combination (MRC), la cual utiliza todas las cadenas de radio para procesar un frame. MRC trabaja combinando la información recibida en cada antena, tomando las componentes más fuertes de la señal recibida por cada antena, y unirlos en un todo coherente. En otras palabras, MRC permite al receptor elegir la mejor antena para cada portadora, y así compensar pérdidas individuales en cada subcanal.

La figura 19 muestra el aumento del rango si se usa MRC. La línea continua es la gráfica de velocidad vs distancia para un receptor de dos flujos mediante MIMO 2x2, mientras que la línea entre cortada es la gráfica de velocidad vs distancia para un receptor de dos flujos mediante MIMO 3x3. No hay cambio en la velocidad máxima debido a que ambos sistemas funcionan como receptores de dos flujos. Sin embargo, el uso de MRC permite tasas de datos más altas para una distancia dada. Dicho de otra forma, el uso de MRC permite la recepción de señales débiles y mayor cobertura para una velocidad dada.

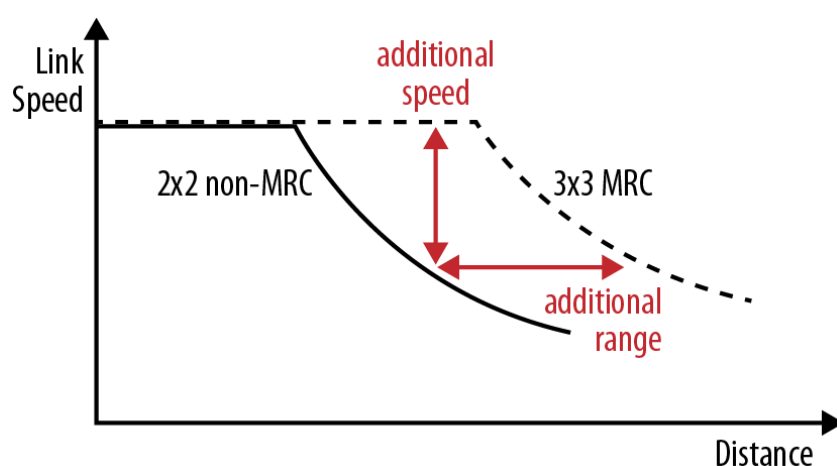


Figura 19. Incremento de rangos usando MRC

Fuente: (Gast, 802.11n: A Survival Guide, 2012)

2.6.1.1.5 Multitrayecto

En una transmisión inalámbrica, debido a las reflexiones y refracciones que sufre el flujo al encontrarse con diversos obstáculos en su camino, tomará múltiples y distintos caminos para alcanzar el receptor. A esto se lo conoce como multicamino o multitrayecto. En un entorno multitrayecto, la antena 1 recibe señales desde la antena A del transmisor (dos trayectos) y la antena B, en total 3 trayectos. Si la señal de la antena B es la de mayor potencia, el transmisor puede elegir decodificar la señal. Mientras tanto si se encuentra que la antena A del transmisor da una buena señal a la antena 2 se puede decodificar la señal en dicha antena. Si el transmisor entiende esto se puede enviar diferente información en los trayectos B-1 y A-2 simultáneamente, conociendo que cada una será recibida en el receptor, con poca interferencia una de otra, duplicando así el throughput del sistema. Normalmente los multitrayectos son un enemigo del rendimiento, pero gracias a MIMO son una característica constructiva.

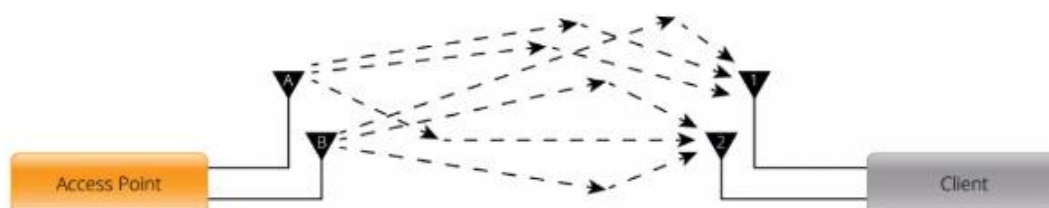


Figura 20. MIMO con multitrayecto

Fuente: (CableFree, 2016)

Las señales que se generan debido al choque con objetos tienen un desfase respecto a la señal primaria, lo que produce interferencias constructivas y destructivas, provocando sumas de degradación de la señal original. En el receptor, la señal que llega no es más que la combinación lineal de las señales multicamino.

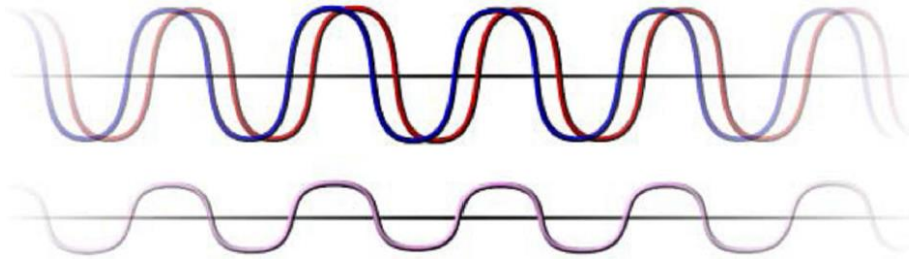


Figura 21. Señales ligeramente desfasadas y el producto de su suma
Fuente: (Anguís Horno, 2008)

También se puede presentar otro tipo de distorsiones como las siguientes:

- Interferencia intersimbólica (ISI). Causada por la propagación multicamino.
- Desvanecimiento de la amplitud de la señal o Fading. Causada por la propagación multitrayecto y los efectos de dispersión que sufre la señal.
- Interferencia Co-Canal (CCI). Causada debido a que dos estaciones emiten información a la misma frecuencia por el mismo canal.
- Canal variante en el tiempo (Doppler). Causada debido al movimiento, ya sea de la estación transmisora o receptora.
- Ruido térmico. Inherente al dispositivo electrónico.

2.6.1.1.6 Clasificación

Se clasifica en dos tipos: Single-User MIMO y Multi-User MIMO.

- Single-User MIMO (SU-MIMO). También conocido como Multi-antenna MIMO, es la tecnología que se describe en este capítulo. Se la puede tratar como MIMO de un solo usuario o MIMO punto a punto. No explota la diversidad de usuario y el acceso múltiple, en otras palabras no está diseñado para trabajar con varios usuarios al mismo tiempo.

Principalmente implementado en 802.11n. Sus principales técnicas son: BLAST (Bell Laboratories Architecture layered Space-Time), PARC (Per Antenna Rate Control) y SPARC (Selective Per Antenna Rate Control).

- Multi-User MIMO (MU-MIMO). Tecnología que maneja un conjunto de técnicas y algoritmos, los cuales aprovechan las ventajas de la diversidad de antenas y la diversidad de usuarios, creando transmisiones punto a punto o multipunto a multipunto, dependiendo del escenario. Esta tecnología se la tratará con mayor detalle y profundidad en 802.11ac.

2.6.1.1.7 Funcionamiento

Un sistema MIMO dispone de NT antenas transmisoras espacialmente distribuidas. El transmisor posee un procesador digital de señales (DSP) el cual codificará un flujo de datos de un solo usuario con velocidad R , en NR subflujos, los cuales tienen cada uno una velocidad R/NR . Cada subflujo es modulado y enviado en paralelo por una antena diferente. Se envían varias señales de forma simultánea a través del canal. Cada ruta multicamino es tratada como un canal independiente. La tasa máxima del canal está relacionada linealmente con el número de subflujos. Debido a la diversidad de antenas se incrementa la distancia de cobertura. Las señales transmitidas se mezclarán, por lo que cada una de las NR antenas recibirá la mezcla de todos los flujos. El procesador digital de señales del receptor ordenará y combinará los flujos, recuperando así la señal original. El proceso que se acaba de describir se lo muestra en la figura 22.

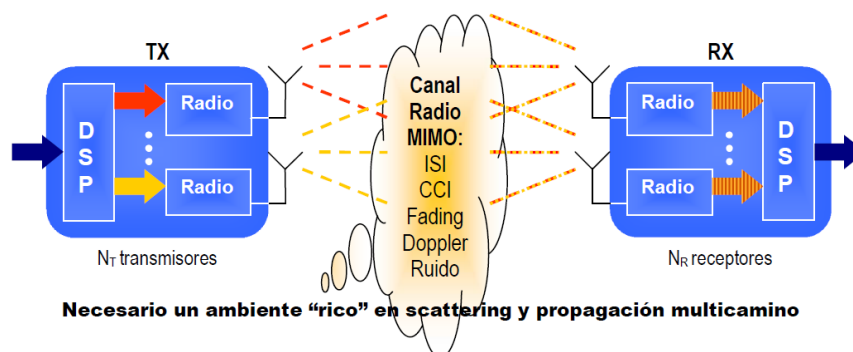


Figura 22. Esquema general de un sistema MIMO

Fuente: (Anguís Horno, 2008)

Gracias a MIMO existen los siguientes beneficios:

- Tasa de bits. Transmisión simultánea de varios flujos de datos, aumenta la tasa de transmisión sin consumir más espectro, el throughput aumenta en un número igual al flujo de datos transmitidos simultáneamente por el mismo canal.
- Eficiencia espectral. Comparado con los estándares anteriores, lo mejora por lo menos en dos veces los bits transmitidos por Hz.
- Número de usuarios. Mayor número de usuarios que se pueden conectar simultáneamente a la red.
- Cobertura. Mayores distancias sin aumentar la potencia de transmisión.
- Fiabilidad. Probabilidad de error más baja.
- Coste. Menor número de AP para implementar la red.

2.6.1.2 Canales de 20 y 40 MHz

802.11n ofrece dos características para aumentar la utilización del espectro de radio: 20 MHz y 40 MHz. Dentro del canal de 20 MHz, respecto a los otros estándares, incorporan un mayor

número de subportadoras, las cuales no eran utilizadas: 52 de datos (2 subportadoras al inicio y 2 subportadoras al final del canal) y 4 piloto (proporcionan medición y calibración del canal). Gracias a MIMO aumenta la eficiencia de las subportadoras piloto. El esquema antes descrito se observa en la figura 23.

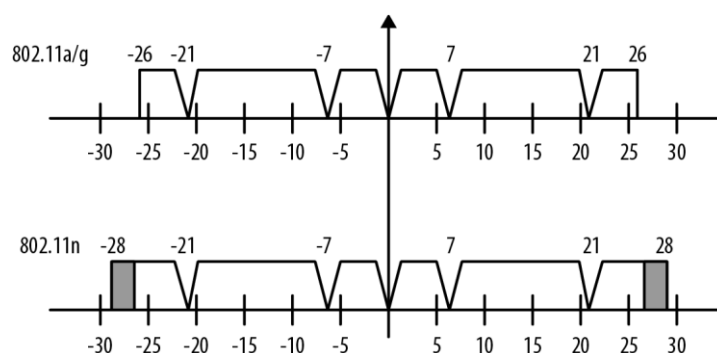


Figura 23. Comparación entre 802.11a/g y 802.11n
Fuente: (Gast, 802.11n: A Survival Guide, 2012)

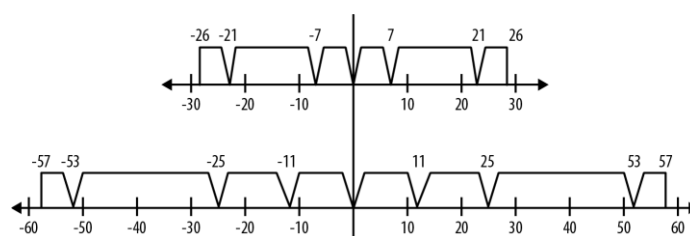


Figura 24. Comparación entre un canal 802.11n
de 20 MHz y un canal de 40 MHz
Fuente: (Gast, 802.11n: A Survival Guide, 2012)

Los canales de 40 MHz están formados por dos canales de 20 MHz adyacentes. La máscara espectral (basada en 802.11a) se ajustó hasta los -45 dBr (Densidad Espectral de Potencia). Los canales de 40 MHz se forman de la siguiente forma: la cola del primer canal (usada para reducir interferencia entre canales adyacentes) y la cabecera del segundo canal desaparecen, dejan de ser útiles, por lo que el ancho de banda que ocupan se utiliza para transmitir datos y se suman ambos

canales. A dicha técnica se la conoce como canal envolvente (cannel bounding). La unión de ambos canales permite aumentar el throughput al doble aproximadamente. El esquema descrito antes se lo puede observar en la figura 24.

Cuando dos dispositivos, uno con canal de 20 MHz y otro con canal de 40 MHz, se encuentran en canales adyacentes, el dispositivo de 20 MHz experimenta una mayor interferencia co-canal. Los canales de 40 MHz se pueden utilizar en la banda de 5GHz, o en 2,4 GHZ cuando no interfieran con otro 802.11. Comparado con un canal de 20 MHz, un canal de 40 MHz aumenta al doble el rendimiento el throughput, debido a que reduce la sobrecarga en el canal a una fracción del mismo. Las subportadoras piloto no transmiten datos en capas más altas. El uso efectivo de subportadoras piloto en sistemas MIMO permite aumentar la eficiencia espectral en 4%. En la Tabla 3 se muestra las subportadoras que maneja cada estándar.

Tabla 3

Descripción de portadoras de cada estándar

PHY standard	Subcarrier range	Pilot subcarriers	Subcarriers (total/data)
802.11a/g	-26 to +26	-21, -7, +7, +21	52 total, 48 usable
802.11n, 20 MHz	-28 to +28	-21, -7, +7, +21	56 total, 52 usable
802.11n, 40 MHz	-57 to +57	-53, -25, -11, +11, +25, +53	114 total, 108 usable

Fuente: (Gast, 802.11n: A Survival Guide, 2012)

2.6.1.3 Modulación

La capa física del estándar, para el sistema de comunicación, utiliza el sistema de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM, Ortogonal Frequency Division Multiplexing), al igual que 802.11a/g.

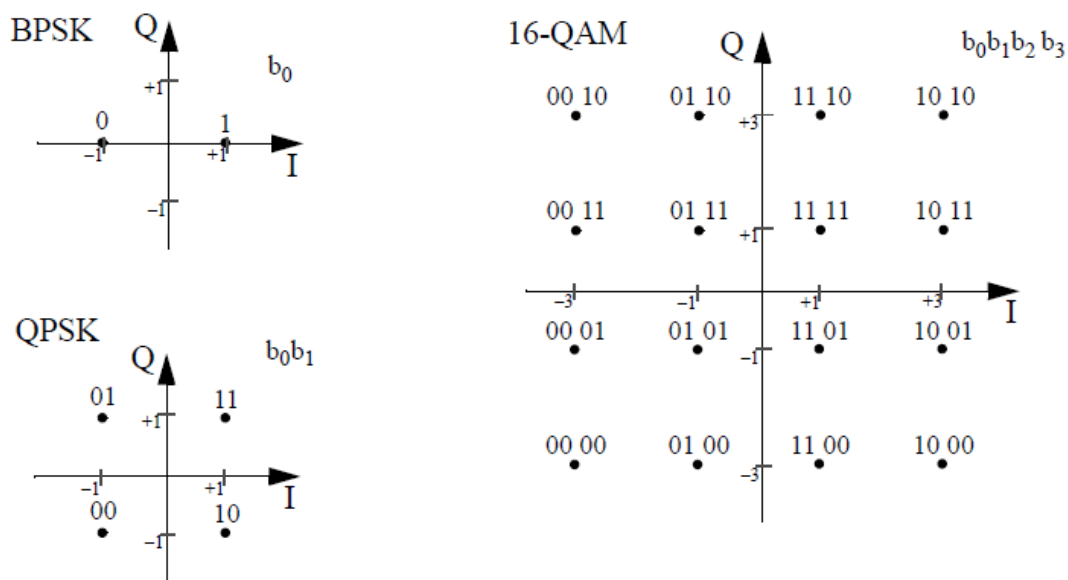


Figura 25. Diagrama de constelación para los esquemas BPSK, QPSK, 16-QAM
Fuente: (IEEE 802.11 Working Group, 2012)

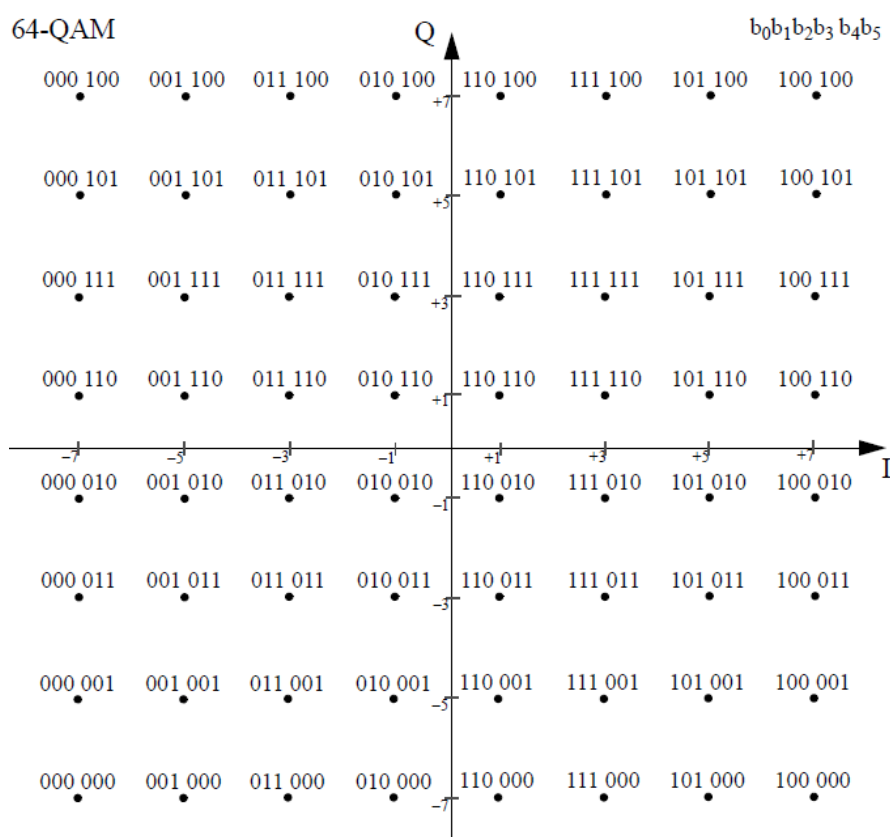


Figura 26. Diagrama de constelación para el esquema 64-QAM
Fuente: (IEEE 802.11 Working Group, 2012)

OFDM divide cada canal en subcanales, cada subcanal tiene una subportadora propia la cual maneja y transporta información distinta a la de las otras subportadoras. En otras palabras, se modula un conjunto de datos entre las diferentes subportadoras, lo cual permite una menor pérdida de información ante posibles interferencias.

El sistema utiliza 52 subportadoras, 48 de datos y 4 piloto, que se modulan mediante Codificación de Desplazamiento de Fase Binaria (BPSK, Binary Phase Shift Keying) o en Cuadratura (QPSK, Quadrature Phase Shift Keying) o usando 16 o 64 de Modulación de Amplitud en Cuadratura (16-QAM, 64-QAM, Quadrature Amplitude Modulation).

Las subportadoras piloto se usan para una robusta detección coherente contra los desplazamientos de frecuencia y ruido de fase, además de sincronización. Se usa codificación de corrección de errores hacia adelante con un velocidad de codificación de $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$ y $\frac{3}{4}$. El aumento del ancho de banda (40 MHz) permite manejar un número mayor de subportadoras, lo cual es uno de los requisitos principales para alcanzar velocidades de hasta 600 Mbps.

2.6.1.4 Intervalo de guarda (GI)

Conocido en inglés como Guard Interval, es el parámetro que permite la reducción de cabeceras. En ambientes multitrayecto, suele ocurrir que el inicio de un nuevo símbolo llega al receptor antes que se haya entregado el símbolo previo, lo cual aumenta la SNR. A esto se lo conoce como interferencia intersimbólica o interferencia entre símbolos. El intervalo de guarda es un periodo de tiempo usado para minimizar la interferencia entre símbolos.

Generalmente en sistemas OFDM, el intervalo de guarda es cuatro veces el tiempo de propagación de retraso más alto. En 802.11a, los diseñadores establecieron un valor de propagación

de retraso de 200 ns, teniendo así un intervalo de guarda de 800ns. Para 802.11n, además del valor ya establecido, se puede utilizar un intervalo de guarda corto de 400 ns. La parte del tiempo del símbolo dedicada a la transmisión de datos se mantiene en 3,2 μ s, mientras que el intervalo de guarda cambia a 0,4 μ s, lo cual permite la reducción del periodo de símbolo de 4 μ s (3,2 μ s + 0,8 μ s) a 3,6 μ s (3,2 μ s + 0,4 μ s), incrementando el throughput en un 11% y reduciendo la sobrecarga OFDM en un 10%. El intervalo de guarda corto puede ser utilizado cuando no exista una distancia considerable entre el emisor y el receptor. También depende de la propagación multitrayecto. La interferencia multitrayecto es considerable cuando hay reflexiones significativas debido al metal.



Figura 27. Comparación entre un intervalo de guarda largo y un intervalo de guarda corto
Fuente: (Gast, 802.11n: A Survival Guide, 2012)

2.6.1.5 Set de codificación y modulación (MCS)

Conocido como Modulation and Coding Set, describe el número de flujos espaciales, modulación y código de corrección de errores que se usa en la transmisión. 802.11n soporta:

- Modulación igual. Todos los flujos espaciales se modulan de la misma manera.
- Modulación desigual. Todos los flujos espaciales se modulan de distinta manera.

802.11 define 77 combinaciones posibles, aunque los productos soportan modos de modulación iguales, que son los 32 primeros valores. En la Tabla 6 y la Tabla 7 están la lista de valores MCS comunes junto con sus velocidades de enlace.

2.6.1.6 Código de verificación de paridad de baja densidad (LDPC)

También conocido como Low-Density Parity Check, es un código convolucional de verificación opcional dentro de 802.11n, el cual utiliza muchos 0s y pocos 1s en la matriz de verificación de paridad, lo cual ofrece ganancia de codificación en comparación con otros códigos convolucionales. Dependiendo el modelo del canal, LDPC incrementa la SNR entre 1,5 y 3 dB. Opera con palabras de código de 648 bits, 1296 bits y 1944 bits de longitud. Cuando se envía un frame a la interfaz 802.11n para su transmisión se lo divide en bloques en función de la longitud de la palabra de código (Tabla 4). La velocidad de codificación define el número de bits que deben ser añadidos para detección y corrección de errores.

Tabla 4

Tamaño de bloque LDPC y velocidades

Code rate	Data bits per code word
R=1/2	324, 648 or 972
R=2/3	432, 864 or 1296
R=3/4	486, 972 or 1458
R=5/6	540, 1080 or 1620

Fuente: (Gast, 802.11n: A Survival Guide, 2012)

Un dispositivo 802.11n transmite frames codificados por LDPC a STA que han indicado que soportan LDPC en frames Beacon o frames de solicitud de asociación.

2.6.1.7 Frame PLCP

802.11n define un frame en la capa física usando el Protocolo de Convergencia de Capa Física (PLCP, Physical Layer Convergence Protocol). Dicho protocolo tiene tres modos:

- Modo No-HT. Modo requerido para interoperar con dispositivos 802.11a/b/g. Las características de 802.11n no son viables en este modo. El formato de frames PLCP en modo No-HT es el mismo que para 802.11a o 802.11g.
- Modo mixto HT. Los dispositivos 802.11n son necesarios para soportar este modo, en cual en el encabezado PLCP es compatible con los encabezados PLCP de 802.11a/g. En este modo disminuye el throughput de la comunicación. Un frame 802.11n no puede ser decodificado por dispositivos 802.11a/g.
- Modo Greenfield HT. La cabecera PLCP Greenfield es más corta que la del modo mixto HT. Trabaja únicamente con dispositivos 802.11n. Se obtiene mayores beneficios en ambientes con tasas de datos altas y paquetes pequeños, como VoIP.

En el caso que un dispositivo pueda admitir el modo greenfield se lo anunciará a través de un frame beacon. Es más común encontrar en el mercado dispositivos 802.11n que trabajen solo en modo mixto.

2.6.1.8 Proceso de transmisión y recepción

El diagrama de bloques de una interfaz 802.11n se muestra en la figura 28. Una vez que la trama está lista para su transmisión se ejecuta el siguiente proceso:

- Scramble y FEC encoder. Scrambler es el proceso que permite reducir la probabilidad de cadenas largas de bits idénticos antes de ingresar la cadena de bits resultantes al encoder FEC (Forward Error Correction). El FEC es un codificador convolucional o un codificador LDPC. En la figura 28 se muestran dos codificadores FEC, lo cual nos indica que deben usarse dos codificadores cuando se excede los 300 Mbps.

- Stream parser. Es un analizador de flujo, el cual toma la salida del codificador FEC y divide los bits codificados entre los flujos espaciales. La salida del analizador de flujo va hacia el interleave, el cual es el primer componente de una cadena de radio.
- Interleave y mapping. Interleave es un “intercalador” que cambia el orden de los bits, tal cual como en 802.11a/g. El interleave distribuye los bits adyacentes a través de las subportadoras OFDM, lo cual ayuda al código convolucional. Cuando los bits salen del interleave son mapeados a los puntos de constelación para la transmisión. 802.11n utiliza las mismas constelaciones que 802.11a/g.
- Space-Time Block Coding (STBC). Es un paso opcional el cual permite transmitir un flujo espacial a través de dos antenas para redundancia adicional. El STBC toma la salida de las constelaciones y las extiende a través de las cadenas de radio, transformando flujos espaciales en flujos espacio-tiempo.
- Spatial mapping. Los flujos espacio-tiempo son mapeados en las cadenas de transmisión por el spatial mapping. Un mapeo directo es un proceso simple. Como alternativa, el mapeador puede realizar una expansión espacial, en el cual todos los flujos espacio-tiempo se extienden a través de todas las cadenas de transmisión.
- Inverse Fourier Transform y Cyclic Shift. Ambos componentes convierten una señal en el dominio de la frecuencia en una señal en el dominio del tiempo, la cual es transmitida. Para preservar la naturaleza de una transmisión MIMO, el cambio cíclico añade un pequeño retardo de fase a cada cadena de transmisión. El cambio cíclico puede añadirse por cadena de transmisión (figura 18) o puede agregarse una vez creadas los flujos espacio-tiempo (figura 28).

- Guard Interval y Windowing. Se elige el intervalo de guarda que se va a utilizar. Este proceso mejor la calidad de la señal en el receptor.
- La parte encargada del radio amplifica la señal a ser transmitida por una antena. En esta etapa la señal de datos a ser transmitida está lista, y se la ubica en una portadora.

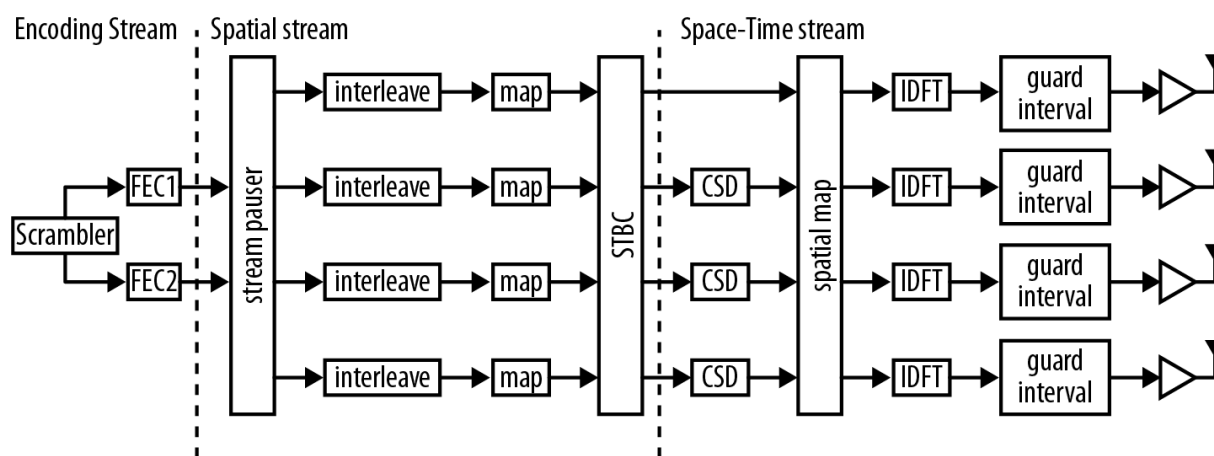


Figura 28. Diagrama de bloques de un transmisor 802.11n
Fuente: (Gast, 802.11n: A Survival Guide, 2012)

Para la recepción, la interfaz 802.11n invierte los pasos. Una señal débil es amplificada a través de un amplificador de bajo ruido (LNA, Low-Noise Amplifier), lo cual permite recuperar los símbolos a través de la transformada de Fourier. Después de separar los flujos espaciales y el interleaver, actúa el FEC para la corrección de errores. El resultado es pasado a la subcapa MAC.

2.6.1.9 Velocidades de 802.11n

A diferencia de los estándares anteriores, en 802.11n entre en juego una serie de opciones, que en conjunto determinan la velocidad de datos. Para realizar el análisis se utilizará un intervalo

de guarda largo, el cual es utilizado en la mayoría de equipos. Se usa un intervalo de guarda conto en entornos de saturación del canal. Las velocidades a analizar son:

- 150 Mbps. Dos flujos espaciales usando canales de 20 MHz, con intervalo de guarda corto y MCS15.
- 300 Mbps. Dos flujos espaciales usando canales de 40 MHz, con intervalo de guarda corto y MCS15.
- 450 Mbps. Tres flujos espaciales usando canales de 40 MHz, con intervalo de guarda corto y MCS15.
- 600 Mbps. Cuatro flujos espaciales usando canales de 40 MHz, con intervalo de guarda corto y MCS31.

2.6.1.9.1 802.11a/g vs 802.11n (1x1)

A nivel comercial, varios dispositivos móviles tienen chips 802.11n pero con una sola antena, lo cual da un solo flujo, esto debido al ahorro de componentes en la cadena de radio y de carga de la batería. Bajo estas condiciones se tiene una pequeña ganancia en la tasa del enlace. 802.11n tiene un 8% más de subportadoras que los demás estándares, lo que se traduce en velocidades de enlace 8% más altas. Esto se lo ve reflejado en la Tabla 5.

2.6.1.9.2 20 MHz vs 40 MHz

La Tabla 6 y la Tabla 7 muestra las velocidades de enlace que se puede alcanzar dependiendo: ancho de canal, modulación, codificación, y flujos espaciales. Se usa un intervalo de

guarda largo. En el caso de usar un intervalo de guarda corto agregar un 11%. En 802.11n cada combinación recibe un número MCS. Ambas tablas muestran números MCS con modulación igual.

2.6.2 Capa de Enlace. Subcapa de Control de Acceso al Medio

A nivel de la subcapa MAC, los cambios que existen respecto a los otros estándares son: agregación de paquetes, block acknowledgement, protección de transmisiones no-HT y características de interoperabilidad.

Tabla 5

Tabla comparativa de velocidad entre 802.11a/g vs velocidad 802.11n equivalente

Modulation/coding	802.11a/g speed	802.11n (1x1, 20 MHz, Long GI) speed
BPSK, R=1/2	6	6,5
QPSK, R=1/2	12	13,0
QPSK, R=3/4	18	19,5
16-QAM, R=1/2	24	26,0
16-QAM, R=3/4	36	39,0
64-QAM, R=1/2	48	52,0
64-QAM, R=3/4	54	58,5
64-QAM, R=5/6	Not used	65,0

Fuente: (Gast, 802.11n: A Survival Guide, 2012)

Tabla 6

Velocidades en 20 MHz

Modulation and coding	1 SS	2 SS	3 SS	4 SS
BPSK, R=1/2	6,5 (MCS 0)	13,0 (MCS 8)	19,5 (MCS 16)	26,0 (MCS 24)
QPSK, R=1/2	13,0 (MCS 1)	26,0 (MCS 9)	39,0 (MCS 17)	52,0 (MCS 25)
QPSK, R=3/4	19,5 (MCS 2)	39,0 (MCS 10)	58,5 (MCS 18)	78,0 (MCS 26)
16-QAM, R=1/2	26,0 (MCS 3)	52,0 (MCS 11)	78,0 (MCS 19)	104,0 (MCS 27)
16-QAM, R=3/4	39,0 (MCS 4)	78,0 (MCS 12)	117,0 (MCS 20)	156,0 (MCS 28)
64-QAM, R=1/2	52,0 (MCS 5)	104,0 (MCS 13)	156,0 (MCS 21)	208,0 (MCS 29)
64-QAM, R=3/4	58,0 (MCS 6)	117,0 (MCS 14)	175,5 (MCS 22)	234,0 (MCS 30)
64-QAM, R=5/6	65,0 (MCS 7)	135,0 (MCS 15)	195,0 (MCS 23)	260,0 (MCS 31)

Fuente: (Gast, 802.11n: A Survival Guide, 2012)

Tabla 7*Velocidades en 40 MHz*

Modulation and coding	1 SS	2 SS	3 SS	4 SS
BPSK, R=1/2	13,5 (MCS 0)	27,0 (MCS 8)	40,5 (MCS 16)	54,0 (MCS 24)
QPSK, R=1/2	27,0 (MCS 1)	54,0 (MCS 9)	81,0 (MCS 17)	108,0 (MCS 25)
QPSK, R=3/4	40,5 (MCS 2)	81,0 (MCS 10)	121,5 (MCS 18)	162,0 (MCS 26)
16-QAM, R=1/2	54,0 (MCS 3)	108,0 (MCS 11)	162,0 (MCS 19)	216,0 (MCS 27)
16-QAM, R=3/4	81,0 (MCS 4)	162,0 (MCS 12)	243,0 (MCS 20)	324,0 (MCS 28)
64-QAM, R=1/2	108,0 (MCS 5)	216,0 (MCS 13)	324,0 (MCS 21)	432,0 (MCS 29)
64-QAM, R=3/4	121,5 (MCS 6)	243,0 (MCS 14)	364,5 (MCS 22)	486,0 (MCS 30)
64-QAM, R=5/6	135,0 (MCS 7)	270,0 (MCS 15)	405,0 (MCS 23)	540,0 (MCS 31)

Fuente: (Gast, 802.11n: A Survival Guide, 2012)

2.6.2.1 Técnicas de agregación de paquetes.

Las técnicas trabajan sobre la trama MAC. Permite enviar dos o más tramas de datos en un solo acceso al medio, lo cual permite reducir las cabeceras y parte de ellos a través de múltiples tramas. Con estas técnicas las tramas aumentan de 4 KB a 64 KB, además se reduce drásticamente el número de colisiones. La limitante que tiene es que las tramas agregadas deben tener el mismo destino. Se definen dos métodos.

2.6.2.1.1 Aggregation MAC Service Data Unit (A-MSDU)

Se realiza al inicio de la capa MAC. Agrega múltiples tramas Ethernet con un destino común en una sola trama 802.11 la cual será transmitida. Es el más eficiente de los dos métodos debido a que la cabecera es Ethernet, la cual es más pequeña en comparación a la cabecera 802.11. Este mecanismo agrupa los MSDUs recibidos desde la capa Logic Link Control (LLC) con el mismo destino y categoría de servicio en un único MPDU.

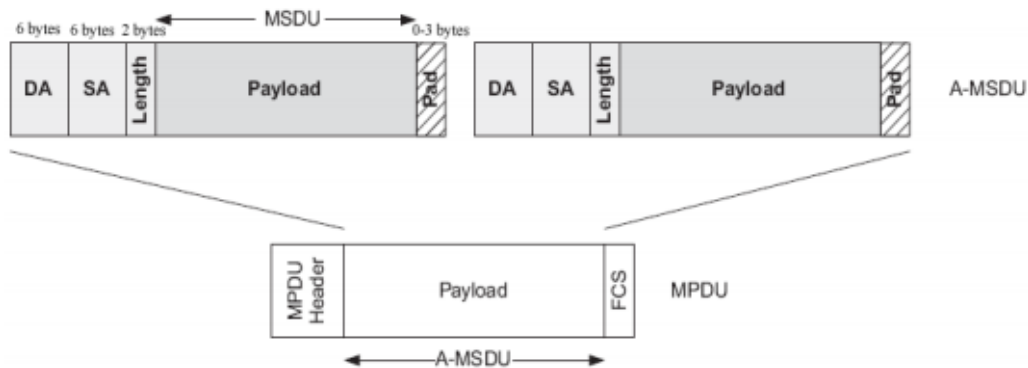


Figura 29. Encapsulamiento A-MSDU

Fuente: (Navarrete Chávez, 2009)

2.6.2.1.2 Aggregation MAC Protocol Data Unit (A-MPDU)

Convierte cada trama Ethernet a 802.11 para luego ser enviadas a un destino común sin ensamblarlas. Cada trama MPDU es agregada lógicamente al inicio de la trama MAC, anteponiendo a cada trama un delimitador y un campo de padding. Luego se agregan como PSDU a la capa física para ser transmitidas como un solo PPDU. Cada trama MPDU en un A-MPDU tiene el mismo receptor y categoría de servicio.

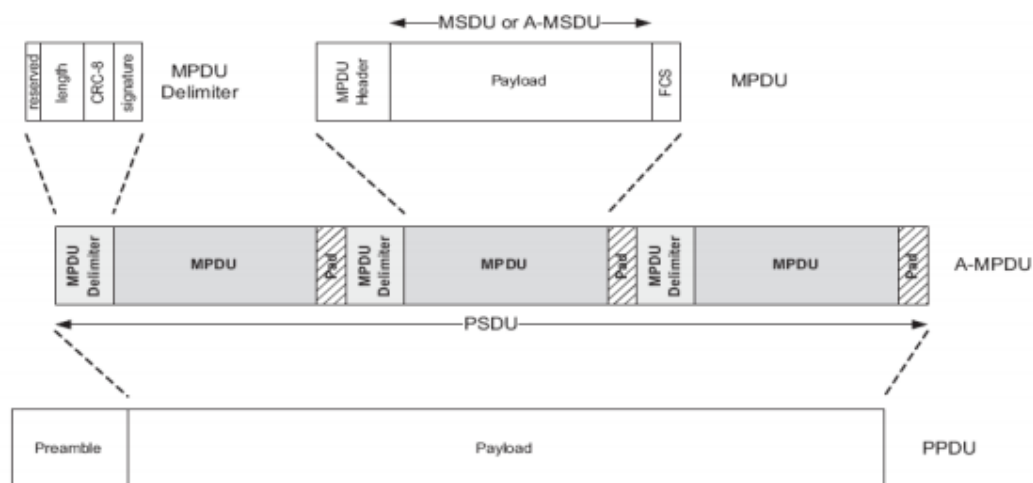


Figura 30. Encapsulamiento A-MPDU

Fuente: (Navarrete Chávez, 2009)

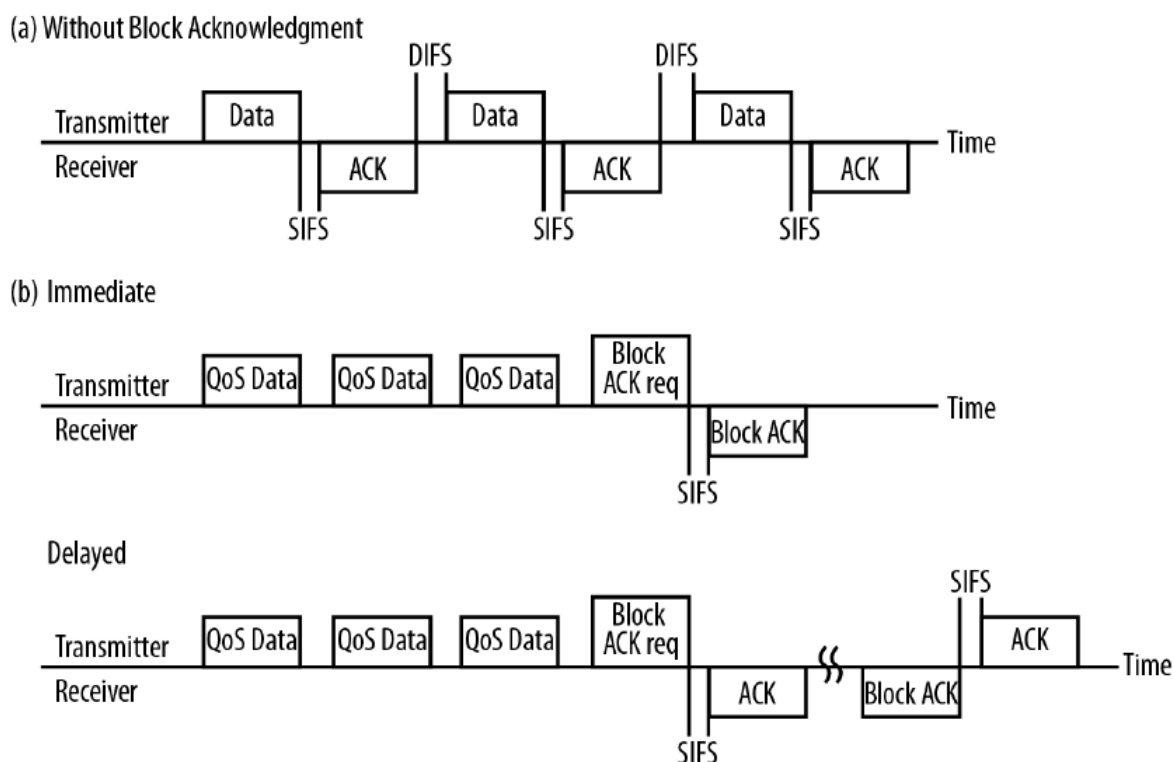


Figura 31. Transmisiones: sin Block ACK (a), con Block ACK (b)
Fuente: (Gast, 802.11n: A Survival Guide, 2012)

2.6.2.2 Block Acknowledgment

En 802.11 MAC, cada trama que se transmite requiere un Acknowledgment (acuse de recibido), y la transmisión no se completa hasta que se reciba el Acknowledgment de confirmación, tal como se muestra en la figura 31(a). En el estándar 802.11e se integra Calidad de Servicio (QoS, Quality of Service) el cual utiliza Block Acknowledgment (Block ACK), lo que permite al transmisor enviar una secuencia de tramas y hacer que todas se reconozcan al mismo tiempo. En 802.11e se definen dos formas de Block ACK, las cuales se muestran en la figura 31(b). Ambas formas son utilizadas en 802.11n.

Con Block ACK inmediato el emisor transmite una serie de tramas y espera un Acknowledgment. En cambio, con Block ACK retardado el receptor puede enviar el

Acknowledgment después de un tiempo. Block ACK configura una “ventana”, la cual permite que el receptor reconozca las tramas dentro de dicha “ventana”. Si se pierde alguna de las tramas QoS, Block ACK acusará las tramas que llegaron al receptor.

2.6.2.3 Protección de transmisiones no-HT

El término nace cuando se lanza 802.11g, y la incompatibilidad de procesar OFDM por parte de dispositivos que utilizan 802.11b. Protege a los dispositivos “nuevos” de interferencias producidas por dispositivos “viejos”. 802.11g definió un protocolo de acceso al medio: MACA (MultiAccess Collision Avoidance o Multi Acceso con Prevención de Colisiones). Según dicho protocolo antes de transmitir el emisor envía una trama RTS (Request To Send) indicando la longitud del paquete de datos que quiere enviar. El receptor le contesta con una trama CTS (Clear To Send), repitiendo la longitud. Una vez que el emisor recibe la trama CTS procede a enviar la información. La solución final fue usar MACA con CSMA/CA. Además de la protección ya mencionada, 802.11n añade nuevos mecanismos de protección, los cuales se verá a continuación.

- Protección a nivel de capa física: L-SIG durante el modo mixto HT. Consiste en alterar el tiempo de uso del medio esperado, el cual se calcula a partir de la cabecera de la trama L-SIG, en el frame de la capa física. Esto permite a los dispositivos 802.11n establecer la duración de la trama L-SIG como el tiempo necesario para transmitir (incluyendo la trama HT) más la cantidad de tiempo requerida para la siguiente trama en la secuencia.
- Protección a nivel de capa MAC: CTS a sí mismo. Un dispositivo 802.11n puede transmitir una trama de control para bloquear el medio durante el intercambio HT. La

trama de control normalmente es un CTS a sí mismo, con lo que los otros dispositivos del área postergan el acceso al medio. Las tramas de control se transmiten a través de un formato que no es HT para que puedan ser entendidas por STAs antiguas.

- Protección a nivel de capa MAC: transmisión en modo switch. Las primeras tramas pueden ser transmitidas a velocidad no HT y establecer el campo de duración MAC para bloquear el acceso al medio. Después que las primeras tramas se establecen con velocidades no HT es posible que dos dispositivos en el intercambio cambien al modo HT.

2.6.2.3 Selección del ancho del canal

Para seleccionar entre canales de 20MHz y 40 MHz se debe tener en cuenta tanto el rendimiento máximo como el rendimiento sostenido de una red. Los canales de 40 MHz requieren que el espectro doble esté libre para utilizarlo. Hay menos canales disponibles para ser utilizados en 40 MHz. En una red densa la reutilización de frecuencias no es buena. Un canal de 40 MHz es más susceptible a interferencia debido a que este canal evitará transmitir cuando uno de sus dos canales de 20 MHz está ocupado. En el espectro de 2,4 GHz una red que utiliza canales de 20 MHz normalmente presentará un mayor rendimiento total, aunque la velocidad medida a un cliente en un instante dado es menor. En el espectro de 5GHz este efecto es casi insignificante debido a los productos que soportan todo el conjunto de canales, y a que el espectro es relativamente abundante. En ambientes residenciales el uso de canales de 40 MHz es viable, debido a que no hay redes superpuestas.

Para que 802.11n pueda utilizar canales de 40 MHz en la banda de 2,4 GHz se implementaron mecanismos de coexistencia para reducir la potencial interferencia entre canales de 20 y 40 MHz. Las tramas Beacon son transmitidas de forma que puedan ser soportadas por todos los receptores. En 5 GHz, las tramas Beacon son transmitidas en formato no HT para que cualquier red 802.11a solapada pueda trabajar con ellas. De igual forma, en el rango de 2,4 GHz las tramas Beacon se transmiten en modulaciones OFDM (802.11g) e incluso CCK (802.11b) para que sean soportadas por dispositivos antiguos.

Para transmitir en 40 MHz una estación debe asegurar que todo el canal esté libre. La evaluación para ver si el canal está libre se lo realiza en el canal primario. El canal secundario debe de estar inactivo antes de que pueda ser utilizado. El mecanismo de detección de portadora virtual llevado a cabo en el vector de asignación de red (NAV, Network Allocation Vector) es actualizado solo para el canal primario. Los dispositivos no actualizan el NAV en función de tramas enviadas al canal secundario.

2.7 802.11ac

Es una evolución del estándar 802.11n. El principal objetivo del estándar es entregar niveles más altos de rendimiento, acordes a las redes Gigabit Ethernet. Usa la banda de 5 GHz. Trabaja con canales de 20, 40, 80 MHz. Tiene soporte opcional para canales de 160 MHz. Soporta hasta 8 flujos espaciales. Trabaja con MU-MIMO. Usa Beamforming, un estándar basado en nanotecnología, que permite a las antenas y circuitos de control enfocar la señal RF transmitida solo en el receptor que la necesita. Utiliza modulación de 256 QAM, lo cual significa que es posible enviar hasta 8 bits por periodo de símbolo, lo cual da una ganancia del 30% aproximadamente. Las

mejoras que se realizaron en 802.11ac son en la capa física y en la capa de enlace de datos. En la capa de enlace de datos se trabajó específicamente en la subcapa de Control de Acceso al Medio (MAC, Media Access Control). Las mejoras que se realizaron en ambas capas se presentan a continuación.

2.7.1 Capa física

A nivel de la capa física, los cambios que existen respecto al estándar 802.11n son: número de flujos espaciales MIMO, ancho de banda del canal y la modulación. En estos tres parámetros radica el aumento de throughput.

2.7.1.1 MU-MIMO

Al igual que cualquier técnica MIMO, MU-MIMO requiere un sistema de transmisión por cada flujo espacial, independiente uno de otro, que para el caso sería un máximo de 8 cadenas de radio y antenas. MU-MIMO es la tecnología clave para que se puedan alcanzar valores de throughput tan altos, y se basa en beamforming permitiendo así múltiples transmisiones simultáneas para múltiples usuarios. MU-MIMO permite al AP la reutilización espacial, es decir, envía múltiples tramas a diferentes STAs de forma simultánea y por el mismo espectro de frecuencias, lo cual reduce los dominios de colisión. MU-MIMO ha resultado ser una tecnología desafiante de implementar, por lo que no está disponible en los equipos Wave1. E incluso, cuando esté disponible (Wave2) vendrá con advertencias.

La figura 33 muestra el patrón de radiación del AP hacia cada STA. Para enviar información hacia “User 1” (azul), el AP forma un lóbulo fuerte hacia dicho usuario. De forma simultánea

minimiza dicha energía en la dirección de “User 2” y “User 3”, lo cual es conocido como null steering (dirección nula). Lo mismo se puede ver en los patrones de radiación del AP hacia “User 2” y “User 3”. De esta manera, cada STA recibe la información deseada.

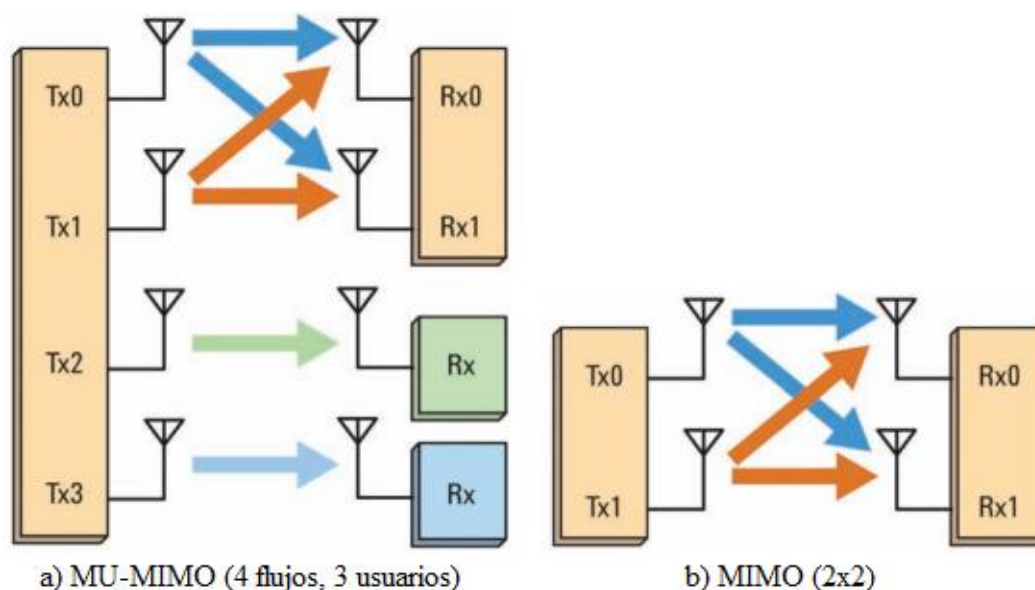


Figura 32. Comparación entre a) un sistema MU-MIMO y, b) un sistema MIMO
Fuente: (Lew, 2012)

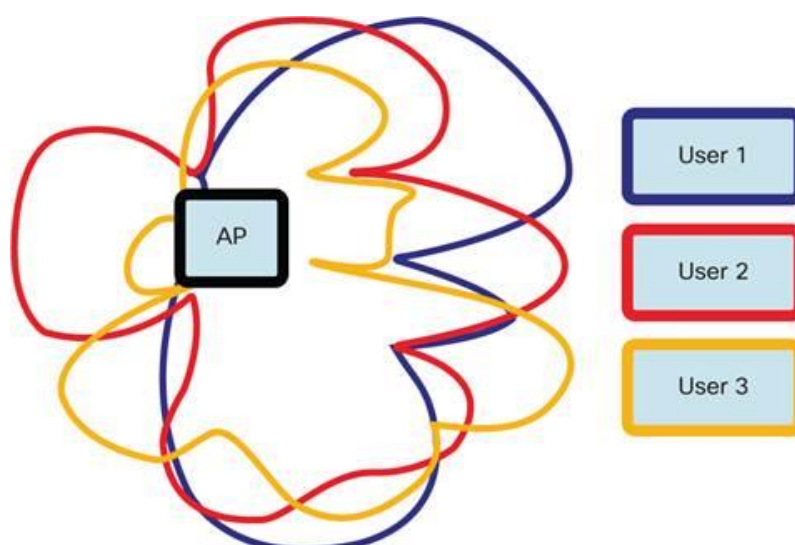


Figura 33. MU-MIMO usando beamforming y null steering hacia múltiples STAs
Fuente: (Cisco, 2018)

2.7.1.1.1 Beamforming

Los APs tradicionales vienen equipados con antenas omnidireccionales, es decir que irradian en todas las direcciones. Beamforming o formación de haces, es un método alternativo el cual enfoca el patrón de radiación hacia la STA. Esto permite que la potencia, relación señal-ruido y throughput aumenten en una dirección específica, mientras que los mismos parámetros en otras direcciones tengan valores menores. Beamforming utiliza arreglos de antenas para alterar dinámicamente el patrón de radiación del AP, y dicho patrón puede cambiar en función de cada trama. Un AP beamforming utiliza métodos de transmisión omnidireccionales para broadcast para mantener el área de cobertura. Beamforming mide el canal y determina como utilizar mejor la potencia de transmisión disponible. En un intercambio de tramas entre un AP y una STA, cualquiera de los dos dispositivos puede calibrar el canal para beamforming. El proceso se lo puede observar en la figura 34.

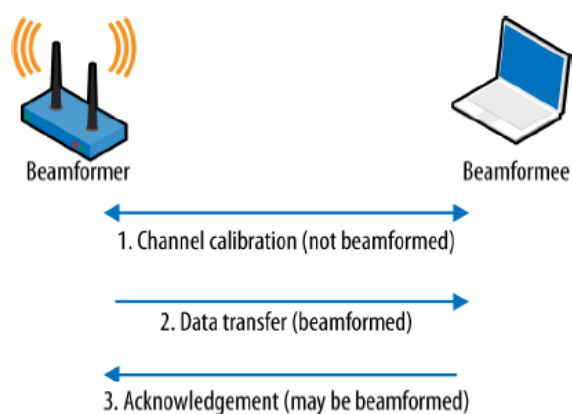


Figura 34. Proceso de beamforming

Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

La ganancia que se podría esperar gracias a beamforming sería de 2 a 5 dB en transmisores de gama media, esto debido a que mejora lo que se llama “rate over range”: a una distancia

específica del AP, una STA tendrá un mejor rendimiento. En intervalos cortos la potencia de la señal es lo suficientemente alta para que SNR soporte el máximo throughput. A intervalos largos no existe diferencia entre la ganancia que presta una antena omnidireccional y una antena beamforming, el throughput será idéntico. Los beneficios de beamforming depende de muchos factores, y únicamente el conjunto de todas estas técnicas producen las mejoras drásticas en el rendimiento del estándar.

2.7.1.1.1 Null Data Packet

Beamforming no es nuevo, pero para 802.11n se hizo un estándar y así poder implementarlo. A pesar de ello no fue posible debido a que en el estándar se describían una gran cantidad de métodos, lo cual era muy complejo de implementar, por lo que los vendedores decidieron no implementar ninguno. En 802.11ac esto se resuelve estableciendo la implementación de un solo método llamado Null Data Packet (NDP) sounding (sondeo de paquete de datos nulo).

- Proceso para medir el canal. En 802.11ac beamforming utilizar channel sounding para calibrar el canal, lo cual determina como radiar energía en una dirección específica. Algunos factores influyen en dicha elección: OFDM, que en una frecuencia en particular los dispositivos respondan mejor, etc. Matemáticamente la capacidad de dirigir la energía de radiación viene dada por la matriz de dirección (steering matrix), representada con la letra Q , ya que permiten representar la respuesta en frecuencia de cada cadena de transmisión sobre cada flujo de transmisión, y de ser el caso modificarla. Sondar el canal consiste de tres pasos:

1. El beamformer transmite un frame de anuncio NDP, el cual permite ganar el control del canal e identificar beamformees. Únicamente los beamformees responder al anuncio, mientras que las demás STA esperaran hasta que se complete la secuencia de sondeo.
2. El beamformer transmite un NDP el cual permite que el beamformee calcule los campos de formación de OFDM para calcular la respuesta del canal y la matriz de dirección.
3. El beamformee analiza los campos de formación del NDP recibido y calcula la matriz de retroalimentación, representada con la letra V . Esta matriz permite al beamformer calcular la matriz de dirección.
4. El beamformer recibe la matriz de retroalimentación, calcula la matriz de dirección para dirigir la transmisión hacia el beamformee.

Si la ganancia en velocidad para transmitir una trama beamformed no es suficiente para compensar el tiempo consumido por el sondeo, entonces la velocidad global será más lenta.

- Matriz de retroalimentación. La clave para beamforming es la matriz de dirección Q , pero esta puede llegar a tener dimensiones potencialmente grandes. En vez de transmitir dicha matriz, el beamformee calcula la matriz de retroalimentación y la comprime para que pueda ser representada en un frame más pequeño. La compresión de la matriz de beamforming se lo hace mediante operaciones de matriz, y así se envía únicamente un conjunto representativo de valores los cuales permitan reconstruir la matriz. El beamformee realiza el siguiente procedimiento para calcular la matriz de retroalimentación:

1. Una vez recibido el NDP, cada subportadora OFDM se procesa independientemente en su propia matriz la cual describe el rendimiento de la subportadora entre cada elemento de la antena transmisora y cada elemento de la antena receptora. El contenido de la matriz se basa en la potencia recibida y los cambios de fase de cada par de antenas.

2. La matriz de retroalimentación es transformada a través de una operación de multiplicación matricial llamada rotación Givens, la cual depende de parámetros llamados “ángulos”. En vez de transmitir la matriz de retroalimentación completa, el beamformee calcula los ángulos basado en la rotación de la matriz. 802.11ac especifica el orden en el que los ángulos son transmitidos, y así el beamformer pueda recibir una larga cadena de bits y delimitar apropiadamente cada ángulo.
3. Una vez calculado los ángulos, el beamformee los ensambla en una matriz de retroalimentación comprimida, y los envía al beamformer.
4. El beamformer recibe la matriz de retroalimentación y la utiliza para calcular la matriz de dirección para las transmisiones del mismo.

En SU-MIMO hay una matriz de retroalimentación y una matriz de dirección. En MU-MIMO hay una matriz de retroalimentación por cada beamformee, y el beamformer debe mantener una matriz de dirección por cada beamformee. Tres factores son determinantes para determinar el tamaño de una matriz de retroalimentación:

1. A canales más anchos mayor número de subportadoras OFDM, por lo que la matriz de retroalimentación debe de ser más grande para acomodarlas.
2. A mayor número de antenas en el transmisor y en el receptor mayor será el número de combinaciones de pares, y mayor el tamaño de la matriz.
3. 802.11ac permite dos representaciones diferentes de los valores de ángulo, con el fin de que los dispositivos puedan utilizar una mayor resolución de ser necesario.

Los principales valores de los parámetros que influyen en el tamaño de una matriz de retroalimentación están resumidos en la Tabla 8.

Tabla 8*Parámetros de la matriz de retroalimentación*

Number of subcarriers	Per-subcarrier angle count	Angle field size
20 MHz channel: 52 subcarriers	2x2: 2 angles/subcarrier	Single-user: 6 bits or 10 bits/angle
40 MHz channel: 108 subcarriers	3x3: 6 angles/subcarrier	Multi-user: 12 bits or 16 bits/angle
80 MHz channel: 234 subcarriers	4x4: 12 angles/subcarrier	
160 MHz channel: 486 subcarriers	6x6: 30 angles/subcarrier 8x8: 56 angles/subcarrier	

Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

Para calcular el tamaño de la matriz de retroalimentación se debe multiplicar las tres columnas: SU, 3x3 MIMO @ 80 MHz, alta resolución: 1,7 kB.

234 subportadoras x 6 ángulos/subportadora x 10 bits/ángulo = 14040 bits o 1,7 kB; el cual es el valor de una matriz de dirección para SU-MIMO en 802.11ac wave1.

2.7.1.1.2 Single User (SU) beamforming

El beamformer envía un NDP, el cual tiene un formato fijo conocido. El beamformee analiza el NDP recibido y procede a calcular la matriz de retroalimentación que se envía en un frame de respuesta.

2.7.1.1.2.1 Calibración del canal para SU beamforming

Es una sola operación en la cual el beamformer y el beamformee miden en cooperación el canal para proporcionar los datos necesario para el cálculo de la matriz de dirección. El procedimiento de sondeo proporciona la información suficiente para que el beamformer calcule su propia matriz de dirección.

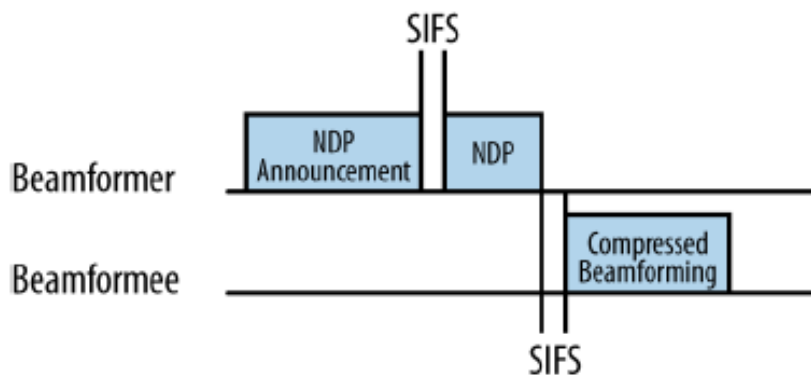


Figura 35. Procedimiento para la calibración del canal en SU

Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

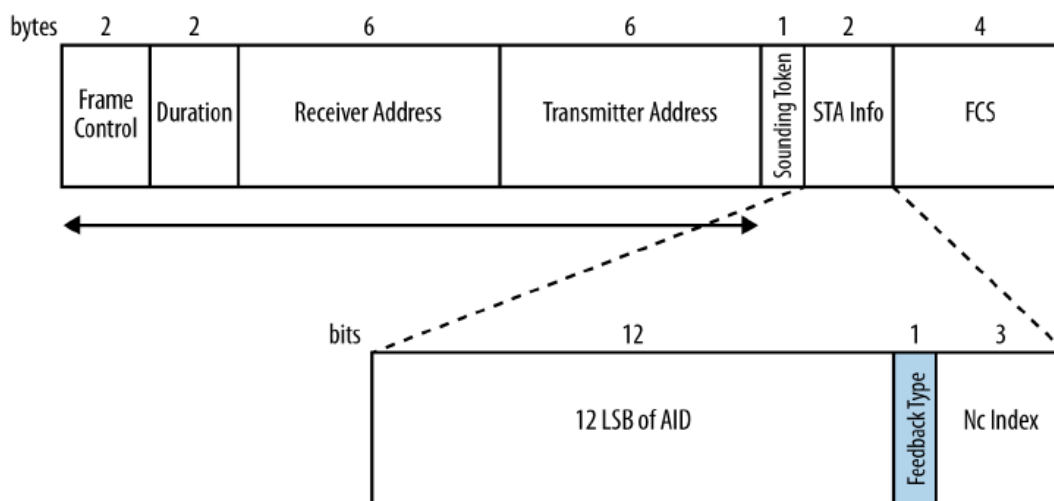


Figura 36. Formato de la trama de NDP Announcement

Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

- NDP Announcement frame. El proceso de sondeo del canal comienza cuando el beamformer transmite un NDP Announcement frame, el cual es un frame de control. Todo el proceso de sondeo se lo realiza en una sola ráfaga, de modo que la duración del NDP Announcement es la duración del intercambio completo de los 3 frames, tal como se muestra en la figura 35. El NDP retransmite el tamaño de la matriz de retroalimentación identificando el número de columnas en la matriz de retroalimentación. El propósito de la trama NDP Announcement es llevar un solo un solo campo de STA Info para el

beamformee destino. El frame NDP Announcement se lo puedo ver en la figura 36. A continuación se describe el campo STA Info:

- AID12. Al asociarse a un AP 802.11, a las STAs se les asigna un ID de asociación. Cuando una STA actúa como beamformer este campo se establece en 0. Los 12 bits menos significativos del ID de asociación está incluidos en este campo.
 - Feedback Type. En un fram SU NDP Announcement este campo es 0.
 - Nc Index. Describe el número de columnas de la matriz de retroalimentación, con una columna para cada flujo espacial. Este campo establece el número de flujos espaciales menos uno. Un campo de 3 bits puede tomar 8 valores, los cuales coinciden con los 8 flujos compatibles con 802.11ac.
- NDP frame. Después de la transmisión del NDP Announcement frame el beamformer transmite un NDP frame, como se lo muestra en la figura 37. La figura muestra una trama PLCP sin campo de datos, por lo que no hay una trama MAC 802.11. En el sondeo de canales se analiza los símbolos de recibidos en el encabezado de PLCP, por lo que no se requieren datos MAC. En un NDP hay un VHT Long Training Field (VHT-LTF) para cada flujo especial usado en la transmisión, y por lo tanto en la transmisión de datos beamformed.

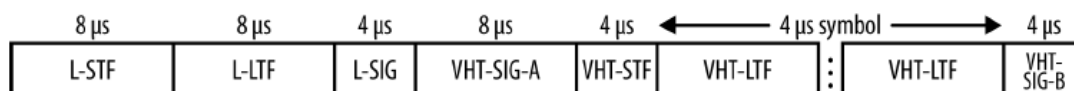


Figura 37. Formato de una trama NDP

Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

- VHT Compressed Beamforming Action frame. La figura 38 muestra el formato de compressed beamforming report frame usado en SU-MIMO. El encabezado de trama

Action indica que la trama contiene una matriz de retroalimentación. El campo VHT MIMO Control permite al beamformer interpretar la matriz de retroalimentación mediante los siguientes atributos:

- Tamaño de la matriz de retroalimentación (6 bits). Los campos Nc Index y Nr Index describen el tamaño de la matriz en términos del número de columnas y filas.
- Channel Width (2 bits). En un canal más amplio la matriz de retroalimentación es más grande debido a que hay un mayor número de portadoras.
- Grouping (2 bits). Cuando partes de la matriz beamforming están repetidas el beamformee puede agrupar múltiples flujos espaciales para reducir el tamaño de la matriz transmitida.
- Codebook (1 bit). La matriz de beamforming se utiliza para describir los desplazamientos en fase requeridos por cada elemento de la antena. 802.11ac transmite información sobre estos ángulos como una cadena de bits. La STA que recibe la matriz de dirección necesita saber dónde dividir el campo de bits en elementos individuales de la matriz, y este campo se utiliza para describir la representación de los datos.
- Feedback Type (1 bit). En SU-MIMO el tipo de retroalimentación será de un usuario único.
- Control de flujo (10 bits). Los campos Remaining Feedback Segments, First Feedback Segment y Sounding Dialog Token para que coincidan la respuesta del beamformee con la solicitud del beamformer.

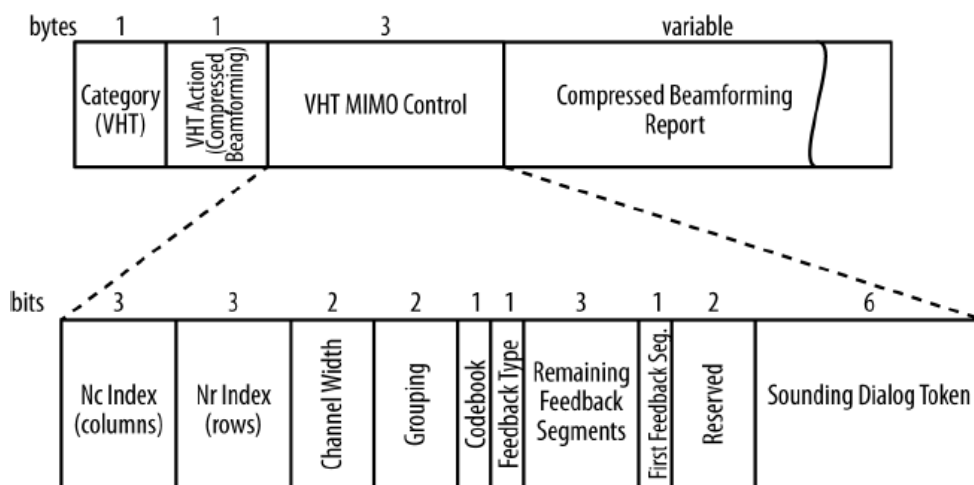


Figura 38. Formato de Compressed Beamforming Action Frame para SU

Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

2.7.1.2 Canales de 80 y 160 MHz

802.11ac trabaja con estos dos tamaños de canal. Divide el canal en subportadoras OFDM, cada una de las cuales tiene un ancho de banda de 312,5 kHz y son independientes una de otra. Unas subportadoras llevan información, mientras que otras son reservadas (piloto) y se utilizan para medir el canal. Todos los dispositivos de este estándar soportan canales de 80 MHz; y para velocidades mayores canales de 160 MHz, los cuales pueden ser un bloque contiguo o dos canales no contiguos de 80 MHz. La figura 39 muestra una comparación entre los estándares. Cada línea horizontal muestra las subportadoras OFDM, mientras que los picos hacia abajo representan las portadoras piloto.

En sistemas MIMO, un único portador piloto puede ser más eficaz para asistir en las operaciones de ajuste del canal. En 802.11ac la sobrecarga del piloto tiene casi un efecto de “descuento” en canales más amplios. La Tabla 9 muestra la numeración de las portadoras OFDM y piloto. Cada subportadora tiene idéntica capacidad de carga de datos, por lo que a más

subportadoras es mejor, y el conjunto de estas define el ancho del canal. A medida que aumenta el canal el porcentaje de portadoras piloto disminuye, lo cual lo hace más eficiente. Los canales 802.11ac tienen la misma forma que los canales OFDM anteriores, difiriendo únicamente en el ancho de la energía transmitida. La figura 40 muestra la forma general de una máscara espectral para 802.11ac, mientras que la Tabla 10 muestra los valores de una máscara espectral dependiendo el ancho del canal.

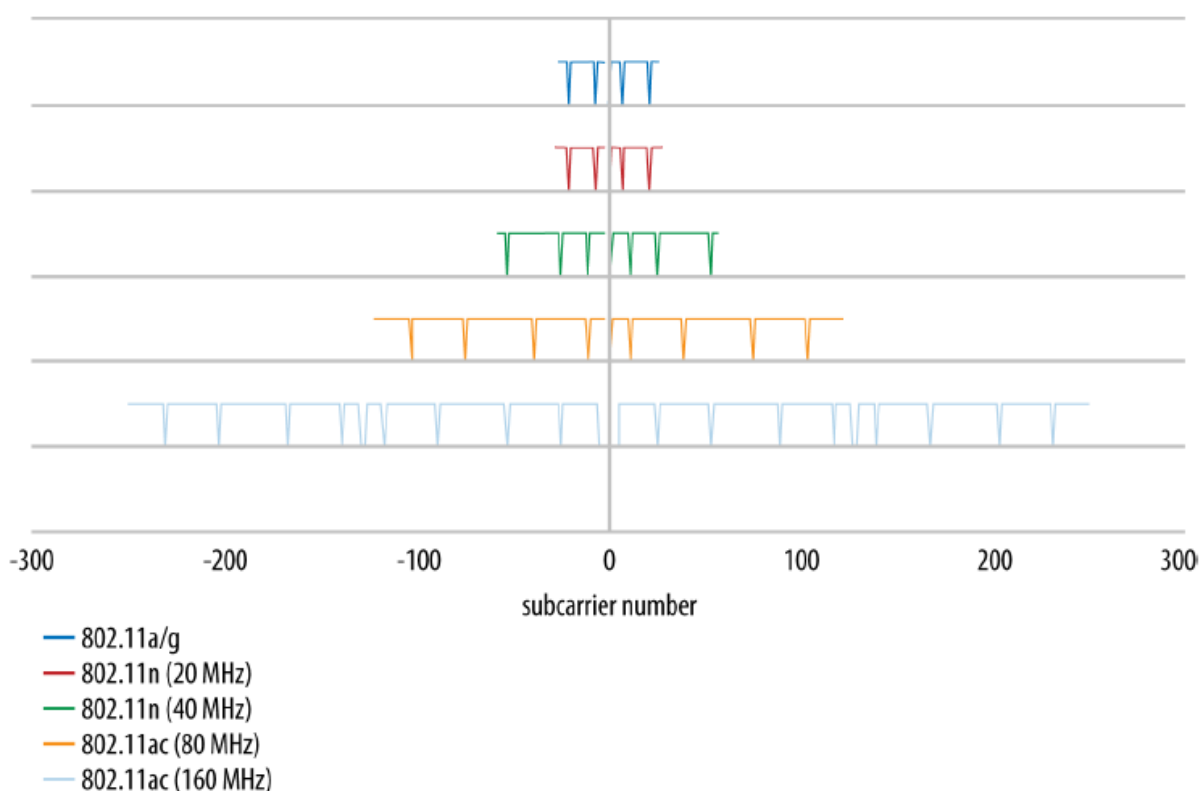


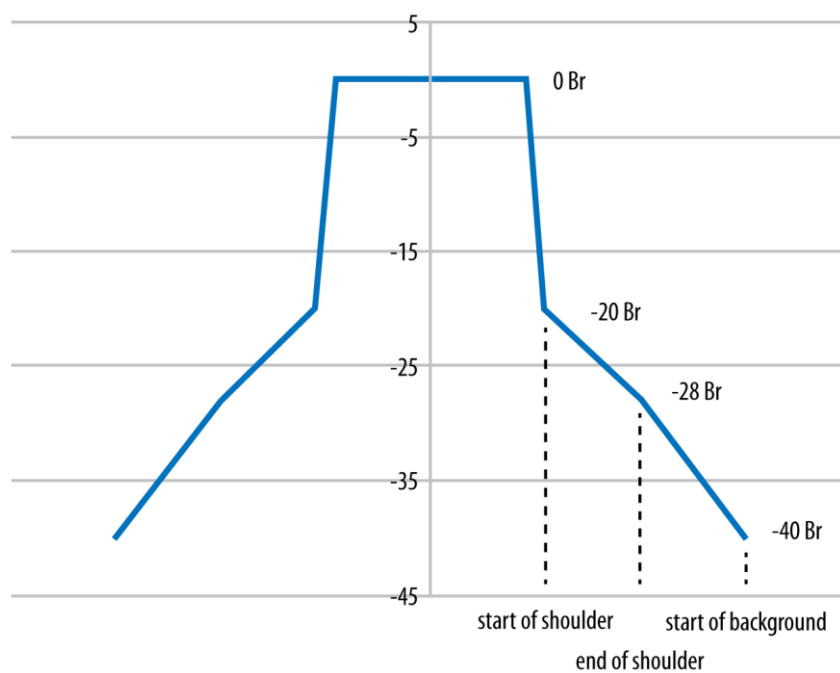
Figura 39. Disposición de los canales de radio

Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

Tabla 9*Descripción de los atributos del canal*

PHY standard	Subcarrier range	Pilot subcarriers	Subcarriers (total/data)	Capacity relative to 802.11a/g	Capacity relative to 20 MHz 802.11ac
802.11a/g	-26 to -1, +1 to +26	$\pm 7, \pm 21$	52 total, 48 usable (8% pilots)	x 1,0	n/a
802.11n/ 802.11ac, 20 MHz	-28 to -1, +1 to +28	$\pm 7, \pm 21$	56 total, 52 usable (7% pilots)	x 1,1	x 1,0
802.11n/ 802.11ac, 40 MHz	-58 to -2, +2 to +58	$\pm 11, \pm 25, \pm 53$	114 total, 108 usable (5% pilots)	x 2,3	x 2,1
802.11ac, 80 MHz	-112 to -2, +2 to +112	$\pm 11, \pm 39, \pm 75, \pm 103$	242 total, 234 usable (3% pilots)	x 4,9	x 4,5
802.11ac, 160 MHz	-250 to -130, -126 to -6, +6 to +126, +130 to +250	$\pm 25, \pm 53, \pm 89, \pm 117, \pm 139, \pm 167, \pm 203, \pm 231$	484 total, 468 usable (3% pilots)	x 9,75	x 9,0

Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

**Figura 40.** Máscara espectral

Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

Tabla 10

Valores de la máscara espectral dependiendo el ancho del canal

Channel size	Edge of peak (0 dBr)	Start of shoulder (-20 dBr)	End of shoulder (-28 dBr)	Start of backgrund (-40 dBr)
20 MHz	9 MHz	11 MHz	20 MHz	30 MHz
40 MHz	19 MHz	21 MHz	40 MHz	60 MHz
80 MHz	39 MHz	41 MHz	80 MHz	120 MHz
160 MHz	79 MHz	81 MHz	160 MHz	240 MHz

Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

Los canales que se encuentran disponibles para 802.11ac es más una cuestión reglamentaria que técnica. Como se ve en la figura 41, 802.11ac utiliza la misma numeración de canales definida por sus predecesores. Los canales están separados por 4 dígitos. Dentro de cada canal, una de las frecuencias se designa como canal primario mientras que las otras frecuencias serían canales secundarios. Esta clasificación es importante para la coexistencia de ancho de banda.

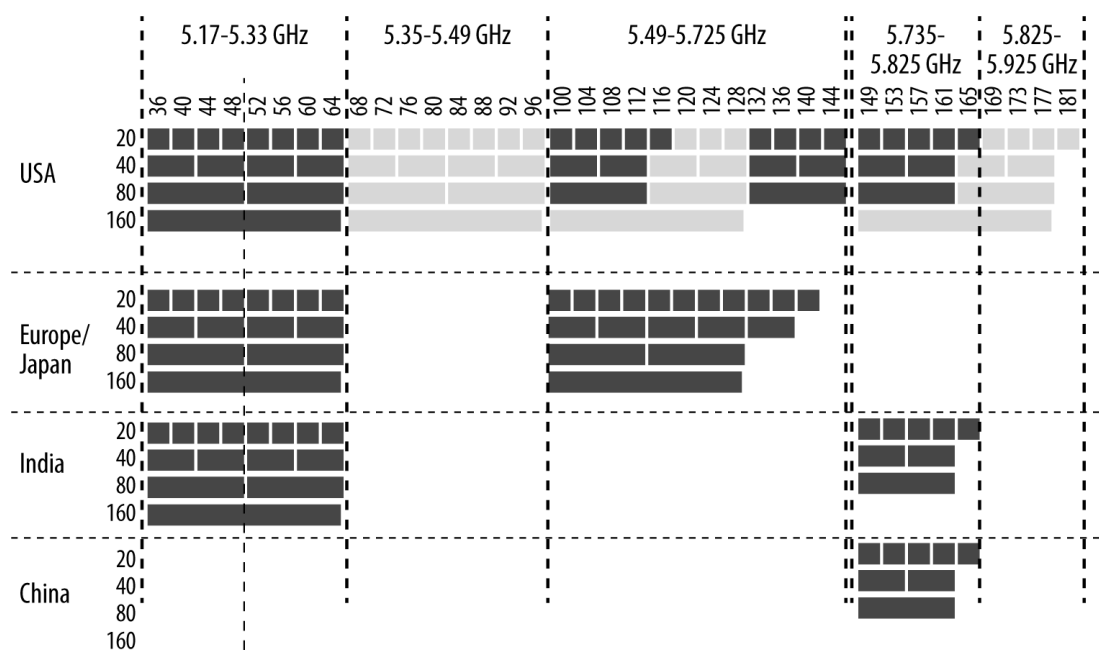


Figura 41. Mapa de canales disponibles para 802.11ac

Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

2.7.1.3 Set de codificación y modulación (MCS)

Seleccionar un set de codificación y modulación (MCS) es muchos más sencillo en 802.11ac que en 802.11n, ya que el estándar especifica únicamente 10 valores, lo cuales están mostrados en la Tabla 11. Los 8 primeros son obligatorios, mientras que los dos últimos dependen de que el vendedor implemente en el dispositivo 256-QAM. Las modulaciones más altas envían mayor cantidad de datos en la transmisión, pero requieren SNR mucho más altas, para lo cual se utiliza un código de corrección de errores. Un atributo fundamental del código de corrección de errores es que agrega información redundante en una proporción descrita por la tasa del código. Un código a una velocidad $R=1/2$ transmite un bit de datos de usuario (numerador) por cada dos bits (denominador) en el canal. Las tasas de código más altas tienen más datos y menos redundancia a costa de no poder recuperarse de tantos errores.

Tabla 11

Valores de MCS para 802.11ac

MCS index value	Modulation	Code rate (R)	MCS index value	Modulation	Code rate (R)
0	BPSK	1/2	5	64-QAM	2/3
1	QPSK	1/2	6	64-QAM	3/4
2	QPSK	3/4	7	64-QAM	5/6
3	16-QAM	1/2	8	256-QAM	3/4
4	16-QAM	3/4	9	256-QAM	5/6

Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

802.11ac hace que el MCS no esté vinculado al ancho del canal, como en 802.11n. Cada uno de los valores MCS conduce a una amplia gama de velocidades dependiendo de la combinación del ancho del canal, número de flujos espaciales e intervalo de guarda.

2.7.1.4 Modulación 256-QAM

La modulación de amplitud en cuadratura (QAM) funciona usando la combinación de nivel de amplitud y cambio de fase para seleccionar uno de los símbolos de la constelación. Los estándares 802.11 anteriores permiten hasta 64-QAM, es decir que cada símbolo de transmisión puede tomar uno de los 64 valores. Mientras que 802.11ac permite hasta 256-QAM, es decir que cada símbolo de transmisión puede tomar uno de los 256 valores. Para identificar cada uno de los 256 valores hay 16 niveles de fase (aproximadamente un cambio de fase) y 16 niveles de cuadratura (aproximadamente la amplitud de la onda). Cada vez que se transmite un símbolo puede tomar uno de los dieciséis cambios de fase y uno de los dieciséis niveles de amplitud.

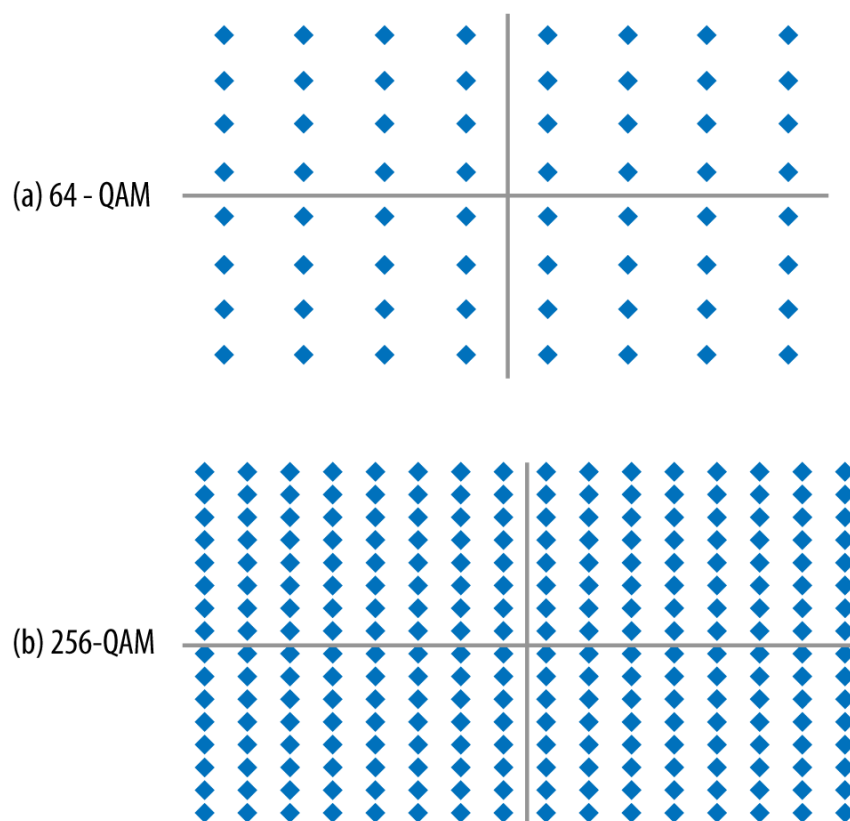


Figura 42. Comparación entre modulaciones
Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

La figura 42 compara las constelaciones de 256-QAM y 64-QAM. Como se observa, 256-QAM es una constelación más densa, por lo que el transmisor debe ser capaz de enviar la información de una manera más precisa, para que el receptor obtenga la transmisión y mapee lo que se recibió. Gracias a esto, 802.11ac puede transmitir un máximo 8 bits por cada subportadora del canal, lo cual representa un aumento del 33% en velocidad respecto a 802.11, el cual transmite como máximo 6 bits por subportadora.

Para utilizar 256-QAM los errores en el enlace de radio deben de ser mucho más pequeños que antes. Idealmente, los puntos recibidos se alinean exactamente con los puntos de la constelación. En la realidad, cuando se recibe un símbolo, este no se alinea exactamente con el punto de la constelación. Este error viene dado por un vector de error, el cual es la diferencia entre un punto de constelación ideal y el punto que corresponde al símbolo recibido, todo esto en dos dimensiones. Más que la dirección del error lo que se usa es el tamaño el error, por lo que se habla de la magnitud del vector de error (EVM). Este error se lo puede observar en la figura 43(a).

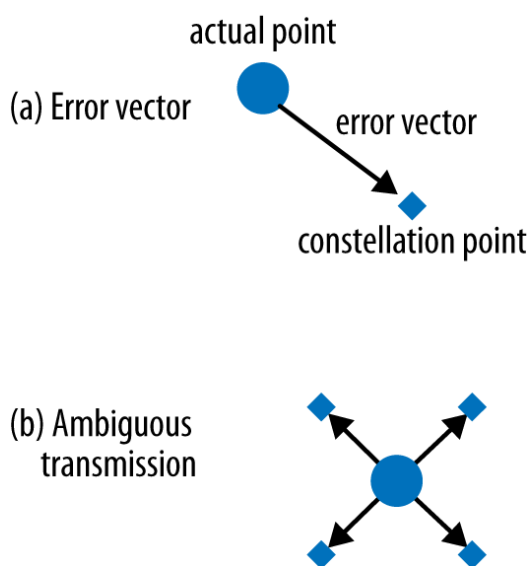


Figura 43. Vectores error

Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

Existe otro error cuando el símbolo recibido se encuentra en el centro de varios puntos de la constelación, como se puede observar en la figura 43(b). El receptor debe elegir uno de los puntos. Si el punto elegido es incorrecto puede ser necesario descartar todo el frame. Para manejar estos errores 802.11ac incluye un código de comprobación de paridad de baja densidad (LDPC). Seleccionar mejores componentes para la interfaz analógica también ayuda.

2.7.1.5 Intervalo de guarda (GI)

El intervalo de guarda es una pausa entre símbolos transmitidos. Es necesario para evitar que las reflexiones por trayectos múltiples de un símbolo lleguen tarde, o interfieran con el siguiente símbolo. En 802.11ac existe el mismo efecto que en 802.11n: el intervalo de guarda se reduce de 0,8 a 0,4 μ s, proporcionando un aumento del 10% en el rendimiento. Tanto el AP como la STA deben de ser capaces de procesarlo.

2.7.1.6 Códigos de corrección de error

Comparado con los 802.11 anteriores, 802.11ac no realiza cambios en los códigos de corrección de errores admitidos. Los códigos convolucionales son admitidos. Como una opción la codificación LDPC también es admitida, y ofrece por lo general una ganancia de 1-2 dB sobre la codificación convolucional. LDPC es soportado en combinación con velocidades más altas y paquetes de transmisión de datos en frames agregados.

2.7.1.7 Trama de la capa física

Al diseñar las tramas para la capa física, lo más importantes era que sean compatibles con los anteriores 802.11. Cuando un AP 802.11ac transmite, los dispositivos 802.11a/n deben ser capaces de ver y evitar la transmisión. Para ello, el formato del frame de la capa física VHT es similar al formato de modo mixto utilizado en 802.11n, y comienza con los mismos campos que un frame 802.11a. Además, para transmisiones MU-MIMO el preámbulo debe ser capaz de describir el número de flujos espaciales y permitir que múltiples receptores se configuren para recibir sus tramas. La figura 44 muestra el formato no HT de un frame OFDM (a), junto con un frame en modo mixto (b) y el frame en formato VHT (c).

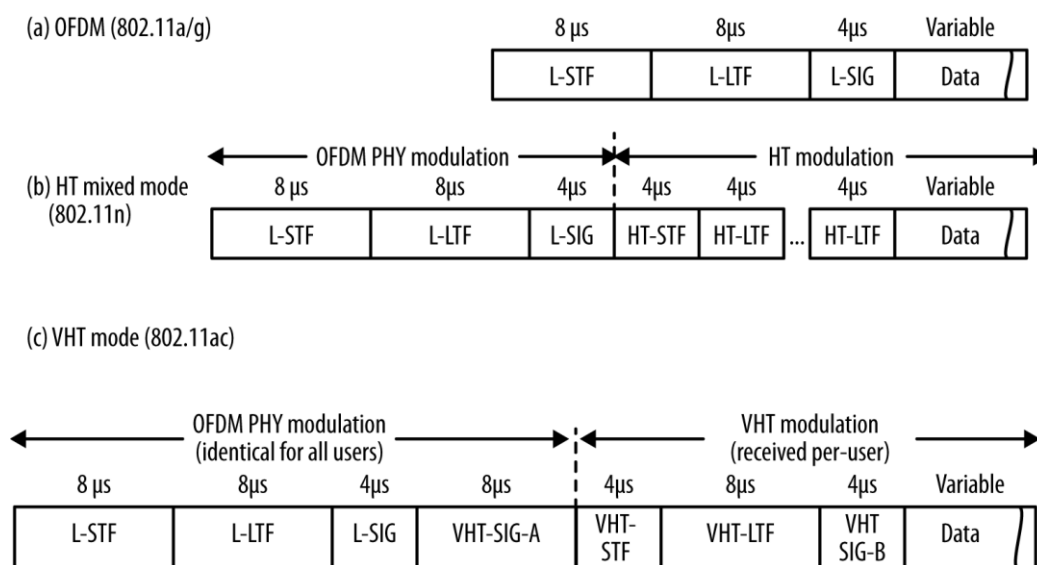


Figura 44. Formato del frame de la capa física VHT

Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

Los campos de una trama VHT son los siguientes:

- Non-HT Short Training Field (L-STF) and Non-HT Long Training Field (L-LTF).

Idénticos a los campos utilizados en 802.11a, consisten en una secuencia de 12 símbolos

OFDM que se utilizan para ayudar al receptor a identificar que una trama 802.11 está a punto de comenzar, sincronizando temporizadores y seleccionando una antena.

- Non-HT Signal Field (L-SIG). En 802.11a este campo es utilizado para describir la velocidad de datos y la longitud (bytes) del frame, lo cual permite al receptor calcular el tiempo de la transmisión.
- VHT Signal A (VHT-SIG-A) and Signal B (VHT-SIG-B) Fields. Únicamente los entienden dispositivos 802.11ac. Tomando ambos campos en conjuntos describen el ancho de canal, la modulación y la codificación, si se trata de un usuario único o de varios usuarios.
- VHT Short Training Field (VHT-STF). Ayuda al receptor a detectar un patrón de repetición y ajustar la ganancia del receptor.
- VHT Long Training Field (VHT-LTF). Tiene una secuencia de símbolos que configuran la demodulación del resto del frame, comenzando con el campo VHT-SIG-B. Dependiendo del número de flujos transmitidos consta de 1, 2, 6, 6 u 8 símbolos. Este campo también se utiliza para el proceso de estimación del canal.
- Data field. Contiene el paquete de protocolo de capa superior, o un frame de agregación que contiene múltiples paquetes de capa superior. Si no hay ningún campo de datos en el payload de la capa física es un NDP, el cual es utilizado para la configurar, medir y sincronizar el beamforming.

2.7.1.8 Proceso de transmisión y recepción

El diagrama de bloques para una interfaz 802.11ac se muestra en la figura 45. Se puede utilizar para transmitir tramas SU o MU, pero nos centraremos en la transmisión a un único usuario.

Cuando la capa MAC presenta un frame para ser transmitido, se lo envía a la capa física y se realiza el siguiente procedimiento:

- Preparación del campo servicio. Para empezar, el campo de servicio que es preparado para la transmisión de datos es construido. El principal componente es el CRC calculado sobre el contenido del campo VHT-SIG-B.
- PHY Padding. Se llena el frame de modo que la longitud coincida con el número de bits requeridos para terminar en un límite de símbolos del nivel físico.
- Scrambling and FEC encoding. El scrambler reduce la probabilidad de idénticas cadenas de bits en la salida. También ayuda a un mejor funcionamiento de los códigos convolucionales sobre datos que no tienen largos ciclos de bits idénticos. La salida del scrambler es alimentada a un codificador FEC (Forward Error Correction), el cual puede ser un codificador convolucional o un codificador LDPC.
- Stream parsing. El analizador de flujo toma la salida del analizador FEC y divide los bits codificados entre cada flujo espacial. La salida del analizador de flujo se envía al intercalador, el cual es el primer componente de la cadena de radio.
- Segment parsing. Todas las transmisiones de 160 MHz son mapeadas en dos segmentos de 80 MHz. El analizador de segmentos no se ejecuta en transmisiones de 20, 40 y 80 MHz.
- Convolutional code interleaving. Los códigos convolucionales funcionan mejor cuando se aíslan los errores. El intercalador toma bits secuenciales de las portadoras y los separa en flujos de bits de código convolucional para separar errores y hacerlos fáciles de corregir.
- Constellation mapping. Los bits se asignan a puntos de la constelación QAM usando la modulación seleccionada.

- LDPC tone mapping. La asignación de tonos toma puntos de la constelación y asegura que son mapeados a subportadoras OFDM separadas por una distancia suficiente.

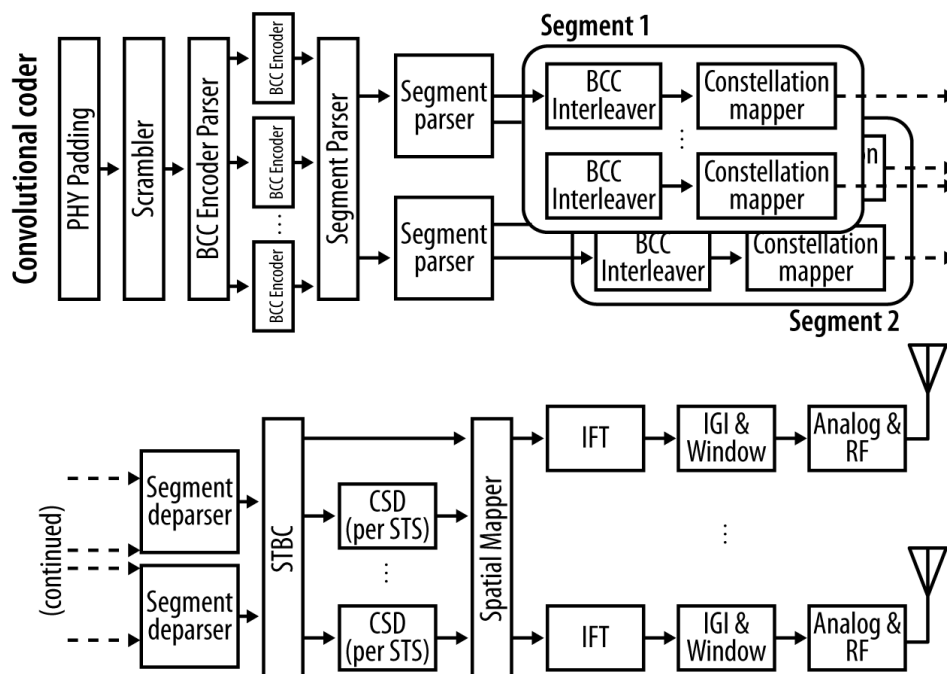


Figura 45. Diagrama de bloques para 802.11a SU

Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

- Segment deparsing. En canales de 160 MHz, el separador de segmentos vuelve a unir los dos segmentos de frecuencia para transformar la constelación de símbolos en un set de flujos espaciales adecuados para la transmisión.
- Space-time block coding (STBC). Este paso es opcional y se lo realiza cuando se desea transmitir un solo flujo espacial a través de varias antenas para tener una redundancia adicional. El STBC toma la salida del símbolo de constelación y lo mapea en múltiples cadenas de radio, transformando los flujos espaciales en flujos de espacio-tiempo.

- Pilot insertion and cyclic shift diversity (CSD). Las constelaciones a ser transmitidas son combinadas con los datos para las subportadoras piloto para crear un set de datos completo para la transmisión. Cuando hay varios flujos de datos, se le asigna a cada uno un pequeño cambio de fase para poder diferenciarlos en el receptor.
- Spatial mapping. Los flujos espacio-tiempo son mapeados en las cadenas de transmisión por el mapeador espacial. El enfoque más simple es un mapeo directo que convierte un flujo espacial en un flujo espacio-temporal para una única cadena de transmisión. Este proceso es clave en beamforming, ya que puede utilizarse para formar una corriente espacio-tiempo para dirigir la energía en la dirección de la STA.
- Inverse Fourier transform (IFT). Toma los datos OFDM que están en el dominio de la frecuencia y los convierte en datos en el dominio del tiempo para transmitirlos.
- Guard insertion and windowing. El intervalo de guarda se inserta al comienzo de cada símbolo y mejora la calidad de la señal del receptor.
- Preamble construction. El preámbulo VHT es construido en los campos modulados non-VHT. El preámbulo se crea para cada canal de 20 MHz dentro del canal de transmisión. Cada segmento de preámbulo de 20 MHz tiene un ligero retardo para protección.
- RF and analog section. Se preparan los datos para transmitir a través de una antena, siguiendo el preámbulo VHT. La forma de onda que viene del paso anterior se convierte en una señal que puede ser ubicada en una portadora en la frecuencia central del canal seleccionado por el AP. Un amplificador de potencia alta (HPA) incrementa el poder de la señal para que la misma viaje como se necesita.

El proceso de recepción es el proceso inverso del proceso que se acaba de describir. Las señales recibidas por las antenas son amplificadas mediante un amplificador de ruido bajo en cada cadena de radio. El preámbulo es usado para configurar el receptor, ajustándolo para cualquier pérdida específica en frecuencia que ocurrió en el canal, obteniendo una serie de símbolos de constelación. En el STBC múltiples flujos de símbolos de constelación se combinarán en un solo flujo de bits; caso contrario, cada flujo espacio-tiempo se convierte en su propio flujo de símbolos de constelación. Los símbolos de constelación se convierten en bits, los cuales son procesados por el FEC, el cual corregirá la mayoría de los errores resultantes. Los bits resultantes se ubican en una trama MAC la cual pasa a la siguiente capa para su procesamiento.

2.7.1.9 Matriz de velocidad

El throughput, en wireless, depende específicamente de tres factores: el ancho de banda del canal, la densidad de la constelación y el número de flujos espaciales. Matemáticamente hablando, la velocidad de la capa física, 802.11ac, se calcula de acuerdo a la figura 46.

PHY	Bandwidth (as Number of Data Subcarriers)	×	Number of Spatial Streams	×	Data Bits per Subcarrier	÷	Time per OFDM Symbol	=	PHY Data Rate (bps)
802.11n or 802.11ac	56 (20 MHz)		1 to 4		Up to $5/6 \times \log_2(64) = 5$		3.6 microseconds (short guard interval)		
	108 (40 MHz)						4 microseconds (long guard interval)		
802.11ac only	234 (80 MHz)		5 to 8		Up to $5/6 \times \log_2(256) \approx 6.67$				
	2×234 (160 MHz)								

Figura 46. Calculo del throughput para 802.11ac

Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

Por ejemplo, para 1300 Mbps, se utiliza una transmisión a 80 MHz, en la cual se envían 234 subportadoras a través de 3 flujos espaciales. Como se utiliza 256 QAM y MCS igual a 9 entonces el code rate es de 5/6, el número de bits es 8 y se utiliza un intervalo de guarda corto (3,6 μ s). A continuación se muestra el cálculo de la velocidad antes mencionada.

$$234 \times 3 \times \frac{5}{6} \times \frac{8 \text{ bits}}{3,6 \mu\text{s}} = 1300 \text{ Mbps}$$

2.7.2 Capa de Enlace. Subcapa de control de acceso al medio

La mayor parte de trabajo de la capa MAC es soportar las nuevas características de la capa física, principalmente tramas más grandes y la distribución de los recursos de radio entre canales de diferentes tamaños.

2.7.2.1 Entramado

En su mayoría, en formato de la trama utilizado es el mismo que el utilizado por sus predecesores, con dos diferencias. El primero es el aumento del tamaño máximo de la trama, a más de 11000 bytes, lo cual incrementa la capacidad de aumentar tramas desde las capas superiores. En segundo lugar reutiliza el campo HT Control. Cuando el campo HT Control tiene el valor de 1, este campo es de tipo VHT-variant, el cual se utiliza para comunicar la retroalimentación MCS. En la figura 47 se muestra el formato de la trama.

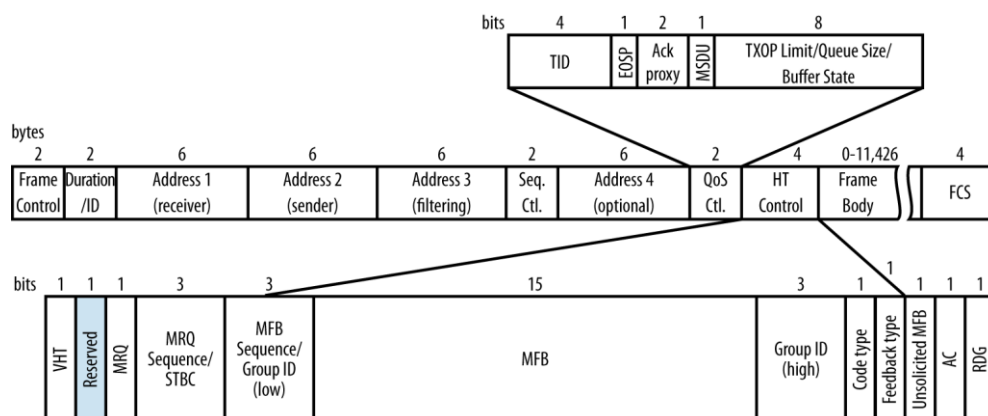


Figura 47. Trama MAC de 802.11ac
Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

2.7.2.2 Agregación y tamaño de la trama

La agregación permite que un dispositivo tenga acceso al canal de radio y enviar múltiples tramas. El método usado disminuye la cantidad relativa de sobrecarga que esto implica. 802.11ac añade una nueva toma de agregación: todas las tramas transmitidas utilizan el formato de trama agregada (A-MPDU), lo cual significa que la capa MAC asume toda la responsabilidad de la fragmentación. La figura 48 muestra el formato A-MPDU. La longitud máxima de una trama A-MPDU viene dada por el campo Maximum A-MPDU, el cual viene descrito por la fórmula: $2^{13+exp} - 1$ byte. El valor de exp va desde 0 hasta 7, por lo que la longitud máxima está entre 8 KB y 1 MB.

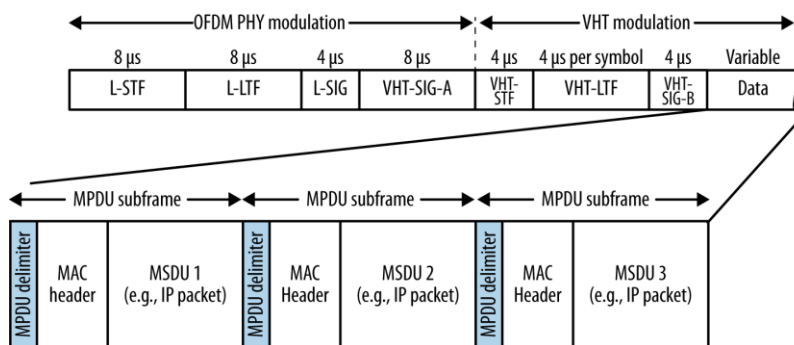


Figura 48. Formato de una trama A-MPDU
Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

2.7.2.3 Procedimientos de acceso al medio

Comparado con los estándares anteriores, 802.11ac no introduce cambios significativos en la forma en que los dispositivos acceden a la red. Sin embargo, cambian las reglas para determinar si el canal está limpio, esto debido a los nuevos anchos de banda. También se añaden nuevas reglas para que los dispositivos indiquen el consumo del ancho de banda.

2.7.2.3.1 Evaluación de canal limpio

802.11ac permite que se determine el ancho de banda en cada trama, para ellos divide el tiempo aire entre canales, lo cual lo hace a través de dividir el espectro en canales primario y secundario. La figura 49 muestra la división de la parte más baja del espectro en canales primarios y secundarios, dependiendo el ancho de banda del canal. El canal primario es el canal “nativo” utilizado para transmitir información. Para transmitir en canales de 40, 80 y 160 MHz, cada uno de los canales de 20 MHz que los conforman deben estar libres. Una de las razones para dividir el espectro en canales primarios y secundarios es optimizar el uso de espectro, permitir que varias redes utilicen el mismo rango de frecuencias. Dos redes pueden compartir un canal de 160 MHz. Ambas redes pueden transmitir tramas en canales de 80 MHz al mismo tiempo debido a que sus canales primarios son diferentes. Esto se puede observar en la figura 50.

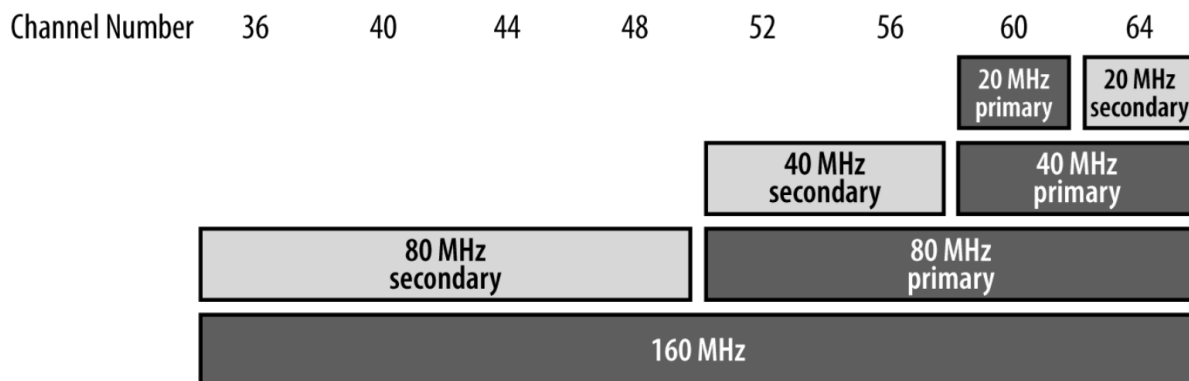


Figura 49. Canales primarios y secundarios dependiendo el ancho de banda
Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

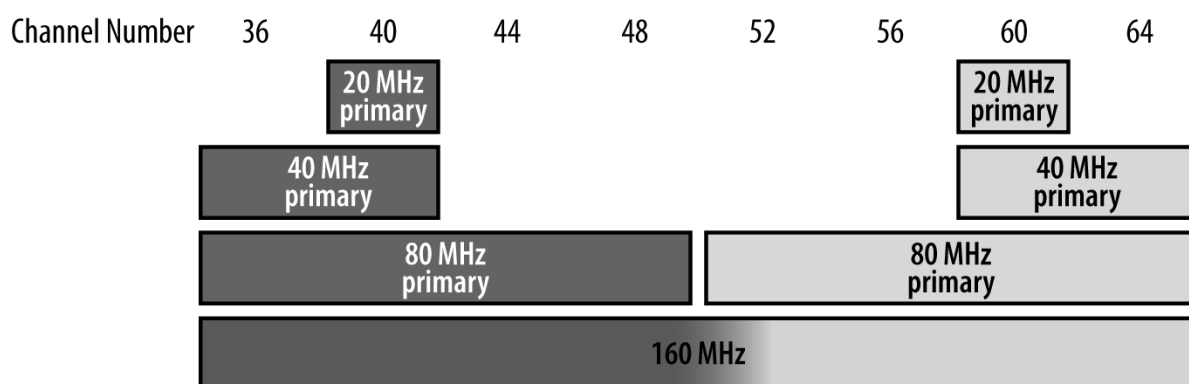


Figura 50. Coexistencia de dos redes dentro del mismo rango de frecuencias
Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

La capacidad para compartir canales depende de la capacidad del dispositivo 802.11ac para detectar transmisiones, tanto en su canal principal como en el secundario. 802.11ac tiene capacidades de evaluación de canal limpio (Clear-Channel Assessment, CCA) de canal secundario suficientemente buenas para que dos redes puedan funcionar sin solaparse, dando lugar a un mayor número de transmisiones en paralelo, proporcionando una mayor gama de opciones de implementación de redes en este estándar.

La regla básica para realizar una transmisión es que el medio esté inactivo. Una vez determinado que el canal, tanto el principal como el secundario, están inactivos, un dispositivo

VHT transmite a través del canal principal. Si uno de los canales no está inactivo, el dispositivo informa que el canal está ocupado y utiliza el procedimiento de retroceso para volver a adquirir el canal. En el procedimiento de retroceso el transmisor espera a que transcurra el espacio entre tramas distribuido para verificar que el canal esté inactivo, e intenta la retransmisión. Para informar que el canal está ocupado, 802.11ac usa detección de señal y detección de energía para canales de 20 y 40 MHz, y agrega reglas para los canales más amplios.

2.7.2.3.2 Protección y coexistencia entre dispositivos 802.11

Gracias a la capa física VHT no se requieren nuevos mecanismos de protección. La reutilización de la cabecera de la capa física asegura que cualquier dispositivo de 5 GHz pueda detectar transmisiones VHT e identificar si el canal está ocupado. Uno de los principales métodos para la coexistencia es la compatibilidad hacia atrás, el cual consiste en que los dispositivos 802.11ac incorporan las velocidades de 802.11a y 802.11n, permitiendo comunicarse con los dispositivos más antiguos a velocidades más antiguas.

La principal ventaja de la coexistencia es que cualquier dispositivo puede recibir un frame. Gracias a la reutilización del preámbulo OFDM un dispositivo 802.11ac puede enviar un frame, y un dispositivo 802.11a puede escuchar el preámbulo de dicha trama, calcular el tiempo en el cual el medio estará ocupado, y diferir la transmisión para evitar colisiones.

2.7.2.3.3 Operaciones de ancho de banda dinámicas (RTS/CTS)

802.11 definió un Request to Send/Clear to Send (RTS/CTS) para el manejo de nodos ocultos. Las tramas RTS/CTS son utilizadas para la gestión del acceso al medio, y son transmitidas

a velocidades inferiores para que puedan ser recibidas por todas las estaciones. En 802.11ac se utilizan tramas duplicadas para crear una señalización de ancho de banda dinámica. Este tipo de transmisión es llamado trama duplicada no HT, el cual permite administrar el acceso a un canal más amplio. Hay dos atributos en este tipo de transmisión:

- La trama se transmite a través de métodos no HT, es decir, una transmisión 802.11a.
- La trama se duplica a través de múltiples canales.

La figura 51 muestra la duplicidad de tramas a través de un canal primario y secundario en una transmisión de 40 MHz. Canales más amplios requieren tres tramas duplicadas (80 MHz), e incluso siete (160 MHz).

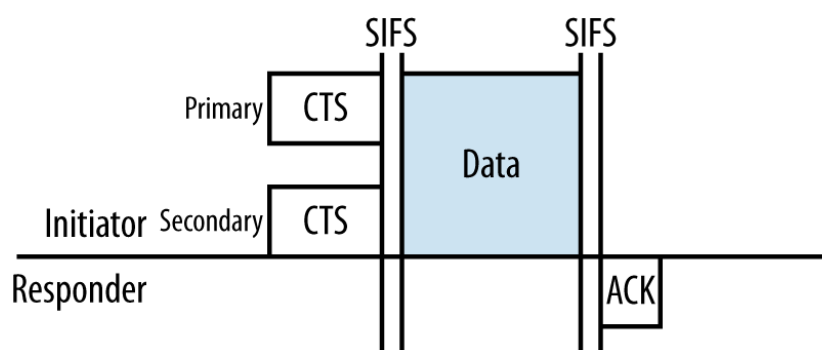


Figura 51. Transmisión de tramas CTS duplicadas

Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

Varias redes pueden utilizar el ancho de banda dinámico para compartir el acceso a los mismos canales. La figura 52 muestra dos redes 802.11ac con canales primarios de 20 MHz, el 56 y 60. No comparten sus canales primarios de 20 o 40 MHz pero comparten el mismo canal de 80 MHz para la transmisión. Ambas redes podrían transmitir tramas de 20 y 40 MHz independientemente, pero tendrían que esperar un tiempo cuando la otra red esté inactiva para transmitir en el canal de 80 MHz, lo cual se observa en la figura 53.

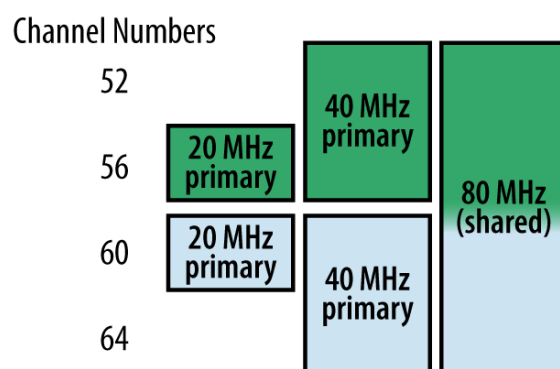


Figura 52. Mapa de canales

Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

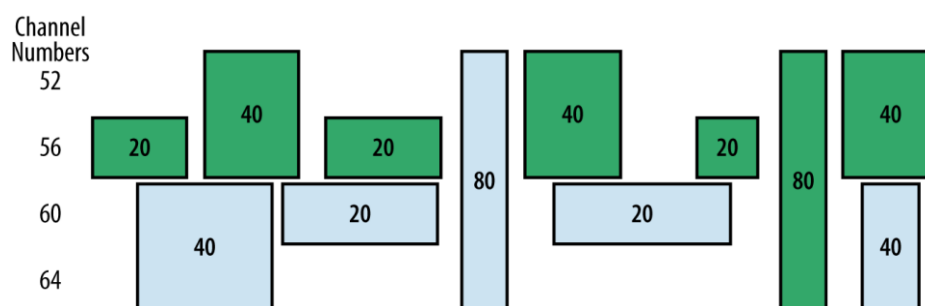


Figura 53. Transmisión en el tiempo

Fuente: (Gast, 802.11ac: A Survival Guide, 2013)

CAPÍTULO III

MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE LOS ESTÁNDARES

802.11N Y 802.11AC

3.1 Introducción

El modelamiento matemático de los estándares 802.11n y 802.11ac se lo realizará a través de una simulación por medio del entorno de software Matlab. La simulación se la realizará a nivel de capa física. El programa planteado maneja los siguientes parámetros: modelo del canal, número de usuarios, cantidad de antenas por usuario, valor MCS, valor SNR, MU-MIMO, pérdidas por choques de la señal y valor del ancho de banda del canal. Los resultados obtenidos de la simulación serán comparados posteriormente con los datos de la parte práctica.

3.2 Canal inalámbrico

El canal inalámbrico se define como el medio por el cual se transmiten las señales, en este caso aire, desde un transmisor hasta un receptor. El canal inalámbrico, al igual que otros medios de transmisión, presenta pérdidas debido a diferentes fenómenos: ruido, dispersión, reflexión, absorción, entre otros.

3.3 Desvanecimiento

También llamado fading, es un concepto que describe los diferentes cambios en amplitud, fase o retardos multitrayecto que presenta la señal en un intervalo de tiempo pequeño o a distancias de propagación pequeñas. La naturaleza estadística de la amplitud de la envolvente de la señal se caracteriza por medio de los siguientes modelos: desvanecimiento Rayleigh y desvanecimiento Rician.

3.3.1 Modelo de desvanecimiento Rayleigh

Modelo estadístico que caracteriza la señal de onda cuando se verifica que: no existe línea de vista entre el transmisor y el receptor (NLOS); y, hay un gran número de objetos que dispersan la energía de la señal. La función de densidad de probabilidad (PDF) Rayleigh viene dada por la siguiente relación matemática.

$$f(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), r \geq 0$$

Donde:

- r , envolvente de la señal recibida,
- $\frac{r^2}{2}$, potencia instantánea,
- σ^2 , potencia media de la señal.

3.3.2 Modelo de desvanecimiento Rician

Modelo estadístico que caracteriza la señal de onda cuando se verifica que existe un trayecto predominante entre el transmisor y el receptor (LOS). Utilizado en ambientes abiertos o en ambientes indoor. La función de densidad de probabilidad (PDF) Rician viene dada por la siguiente relación matemática.

$$f(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right), r \geq 0, A \geq 0$$

Donde:

- r , envolvente de la señal recibida,
- $\frac{r^2}{2}$, potencia instantánea,
- $2\sigma^2$, potencia media de la señal multitrayecto,
- Ar , Amplitud pico de la señal dominante,
- I_0 , función de Bessel modificada de primer tipo y orden cero.

3.3.3 Factor de Rician

Es la relación de potencia entre la señal de la ruta dominante y la potencia de la señal de las rutas dispersas.

$$k = \frac{\text{potencia de la ruta dominante}}{\text{potencia de las rutas dispersas}}$$

Si $k=\infty$ entonces se tiene un canal con ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN, Additive White Gaussian Noise).

3.4 Modelamiento del canal 802.11n

El modelar un sistema de comunicaciones inalámbrico requiere conocer varios factores del mismo: diversidad de antenas en transmisión y recepción, subcanales generados por las antenas, propagación de las señales, factores externos que afectan la señal. En el documento TGn (Task Group 802.11n) Channel Models, emitido por la IEEE para modelar el canal 802.11n, se basan en los trabajos de Medbo y Saleh-Valenzuela. En la Tabla 12 se muestra el modelo Medbo (A-C) más tres modelos adicionales (D-F), en el cual constan el ambiente, condición y modelo.

El modelo Saleh-Valenzuela se utiliza en ambientes multitrayecto. Este modelo define el concepto de taps, los cuales son las componentes de la señal, expresadas en pulsos de potencia, generadas debido a los multitrayectos. Un conjunto de taps forma un cluster. La Tabla 12 muestra el número de clusters por modelo. Ambos modelos describen el canal de transmisión, así como los taps que se originan debido a la transmisión.

El número de taps depende de cada modelo, y tienen valores de ángulo de arribo (AoA, Angle of Arrival) y ángulo de partida (AoD, Angle of Departure). Los modelos trabajan con 10 ns de separación entre taps, y con un ancho de banda de hasta 40 MHz.

Tabla 12*Modelos WLAN SISO*

Ambiente	Propagación	Modelo	Número de clusters
Desvanecimiento plano	LOS/NLOS	A	1
Residencial	LOS/NLOS	B	2
Residencial/oficina pequeña	LOS/NLOS	C	2
Oficina típica	LOS/NLOS	D	3
Oficina grande	LOS/NLOS	E	4
Espacios grandes	LOS/NLOS	F	6

Fuente: (IEEE, 2004)

3.4.1 Correlación espacial y modelo de Kronecker

La correlación espacial es uno de los factores clave para el rendimiento de sistemas MIMO. En MIMO se generan subcanales paralelos e independientes, con ganancias de potencia λ_i . La distribución de las ganancias viene dada por la correlación espacial. Al aumentar la correlación disminuyen los grados de libertad, llegando a tener en un caso extremo hasta un único grado de libertad. Al aumentar la correlación, las ganancias de menor magnitud pueden llegar a desaparecer. Al reducirse la correlación las ganancias más pequeñas tienden a tomar valores más altos, potenciando los subcanales. Al tener un escenario en el cual se tiene dos enlaces, los cuales tiene trayectorias distintas, se dice que los enlaces no están correlacionados entre sí. La correlación depende de las características físicas que tengan tanto el transmisor como el receptor.

La figura 54 muestra un sistema MIMO de 2x2 ($n \times m$), en cual d es la separación entre antenas transmisoras y Δ_r la separación entre antenas receptoras, cada subcanal h_{mn} relaciona las antenas transmisoras con las receptoras.

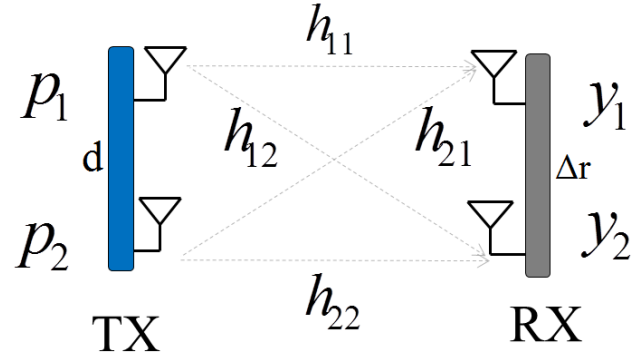


Figura 54. Sistema MIMO 2x2

Fuente: (LLangari Arizo & Mejía Quishpe, 2016)

La matriz de correlación R define el grado de independencia de los enlaces. Matemáticamente la matriz de correlación viene dada por la siguiente expresión.

$$r = \begin{bmatrix} \rho_{11}^{11} & \rho_{11}^{12} & \rho_{11}^{21} & \rho_{11}^{22} \\ \rho_{12}^{11} & \rho_{12}^{12} & \rho_{12}^{21} & \rho_{12}^{22} \\ \rho_{21}^{11} & \rho_{21}^{12} & \rho_{21}^{21} & \rho_{21}^{22} \\ \rho_{22}^{11} & \rho_{22}^{12} & \rho_{22}^{21} & \rho_{22}^{22} \end{bmatrix}$$

Donde ρ_{ij}^{pq} representan el coeficiente de correlación entre h_{ij} y h_{pq} , donde i,p son antenas receptoras y j,q son antenas transmisoras. Si al comportamiento de los canales se lo considera un proceso estacionario, la correlación solo depende de la distancia de separación entre las antenas, por lo que la matriz de correlación viene dada por la siguiente expresión.

$$r = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{11}^{12}(\Delta r) & \rho_{11}^{21}(0) & \rho_{11}^{22}(\Delta r) \\ \rho_{12}^{11}(\Delta r) & 1 & \rho_{12}^{21}(-\Delta r) & \rho_{12}^{22}(0) \\ \rho_{21}^{11}(0) & \rho_{21}^{12}(-\Delta r) & 1 & \rho_{21}^{22}(\Delta r) \\ \rho_{22}^{11}(\Delta r) & \rho_{22}^{12}(0) & \rho_{22}^{21}(\Delta r) & 1 \end{bmatrix}$$

El coeficiente de correlación viene dado por la siguiente expresión.

$$\rho_{x,y} = \langle x|y \rangle = \frac{E[x \cdot y] - E[x] \cdot E[y]}{\sqrt{(E[|x|^2] - |E[x]|^2) \cdot (E[|y|^2] - |E[y]|^2)}}$$

Donde x, y son las envolventes de la tensión media, correspondiente a h_{ij} y h_{pq} respectivamente, y $E[\cdot]$ es el valor esperado.

El modelo de Kronecker asume que las correlaciones de transmisión y recepción son independientes, AoA y AoD son separables, por lo que la ecuación de la matriz de correlación se obtiene mediante la siguiente expresión.

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_t \otimes \mathbf{R}_r$$

Donde:

- \otimes : representa el producto de Kronecker,
- N_t : número de antenas transmisoras,
- N_r : número de antenas receptoras,
- \mathbf{R}_t , matriz de correlación en el transmisor, de tamaño $N_t \times N_t$,
- \mathbf{R}_r , matriz de correlación en el receptor, de tamaño $N_r \times N_r$.

3.4.2 AoA y AoD

El parámetro AoA se define como el ángulo con el que llegan las componentes de la señal a los receptores respecto a un plano de referencia. AoD se define como el ángulo de salida desde el transmisor. Ambos ángulos se los puede observar en la figura 55.

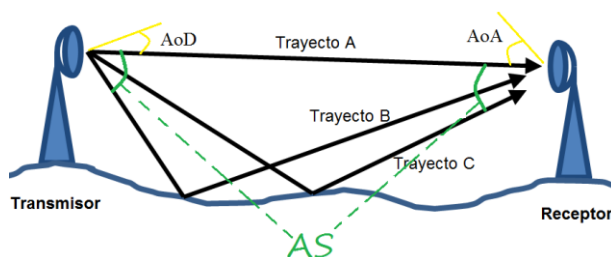


Figura 55. Ángulos AoA y AoD

Los valores para AoA y AoD vienen establecidos en las anexo 1 y 2 para transmisiones SU-MIMO.

3.5 Modelamiento del canal 802.11ac

Viene dado por el TGac, el cual describe las modificaciones a los modelos propuestos por TGn, para así generar el modelo para el estándar 802.11ac.

3.5.1 Modificaciones implementadas

Al usar el estándar canales con un ancho de banda mayor, el espaciamiento entre taps del Perfil de Retardo de Potencia (PDP, Power Delay Profile) se divide por un factor k , el cual viene expresado por la siguiente fórmula.

$$k = 2^{\log_2\left(\frac{BW}{40}\right)}$$

Donde BW es el ancho de banda en MHz. Los posibles valores que se puede hallar a partir de esta fórmula vienen detallados en la Tabla 13.

Tabla 13*Separación de taps según el ancho del canal*

Ancho del canal	Factor k	Separación entre taps
$BW \leq 40$ MHz	1	10 ns
$40 \text{ MHz} < BW \leq 80$ MHz	2	5 ns
$80 \text{ MHz} < BW \leq 160$ MHz	4	2,5 ns

Fuente: (IEEE, 2010)

El cambio en la separación de taps es debido al aumento en número de los mismos, los cuales se generaron en base a una interpolación lineal en los PDP definidos en el TGn. En el anexo 1 se muestra los resultados para el único cluster en el modelo A. En el anexo 2 se muestran los valores obtenidos a través de la interpolación lineal para 80 MHz, los cuales están con color amarillo.

3.5.1.1 Modificaciones en AoA y AoD para MU-MIMO

Para la implementación de MU-MIMO se deben generar ángulos de offset, los cuales dependen del número de usuarios. Estos ángulos se adicionarán a los valores dados de AoA y AoD para 802.11n. Los canales se modifican por cada cliente de la siguiente forma: aplicar un desfase aleatorio uniforme de $\pm 180^\circ$ a los ángulos AoA y AoD, tanto para propagación LOS como NLOS.

3.5.2 Modelamiento del canal MU-MIMO

Para el modelamiento se utilizará un escenario MU-MIMO downlink. El escenario se lo muestra en la figura 56. Consta de un AP, el cual tiene N_{tx} antenas transmisoras, y 3 STA con N_{rx1} , N_{rx2} y N_{rx3} antenas receptoras respectivamente. En el esquema se considera que se tiene tres canales SU-MIMO (H1, H2, H3) independientes, uno por STA. Cada canal asume diferentes

correlaciones espaciales, tanto para el AP como para las STA. La correlación espacial entre las antenas de diferentes estaciones se asume como cero.

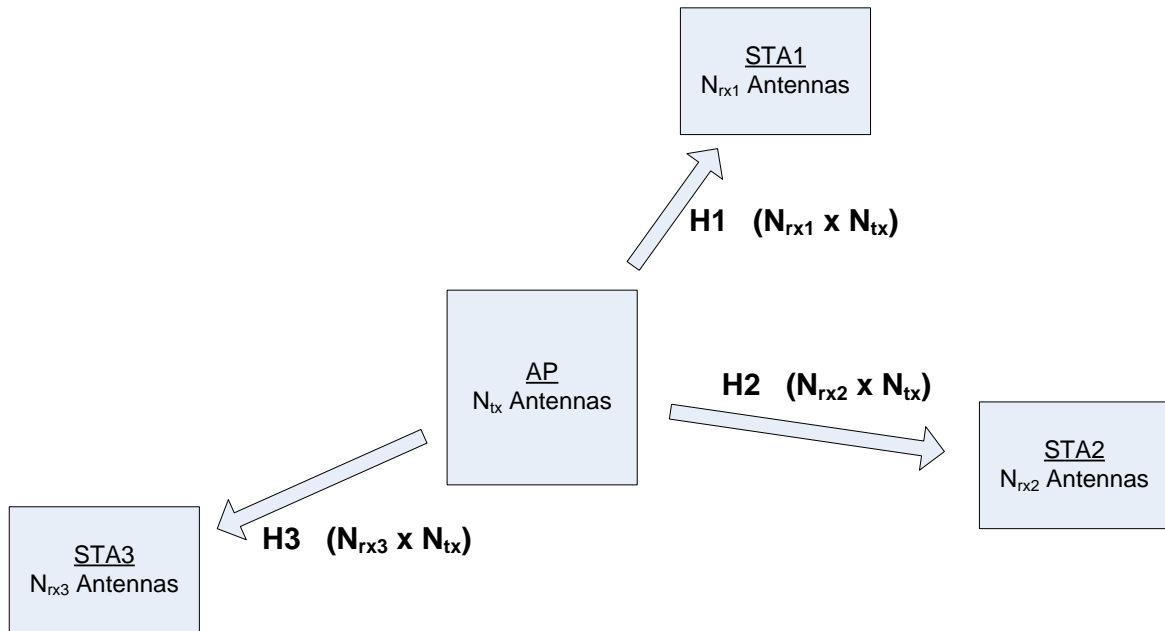


Figura 56. Esquema MU-MIMO downlink
Fuente: (IEEE, 2010)

Para generar el canal MU-MIMO se agrupan los canales SU-MIMO para generar una matriz de tamaño $(N_{rx1} + N_{rx2} + N_{rx3}) \times N_{tx}$, la cual se observa en la figura 57.

$$\mathbf{H}_{\text{MU-MIMO}} \begin{matrix} \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{matrix} \\ \\ \\ \end{matrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H1} \ (N_{rx1} \times N_{tx}) \\ \mathbf{H2} \ (N_{rx2} \times N_{tx}) \\ \mathbf{H3} \ (N_{rx3} \times N_{tx}) \end{bmatrix}$$

Figura 57. Matriz MU-MIMO
Fuente: (IEEE, 2010)

3.6 Simulación de 802.11n y 802.11ac

3.6.1 Condiciones para implementar la simulación

La simulación se define bajo los siguientes parámetros:

- Los modelos a utilizarse son el A y B, detallados en la Tabla 12. Se utilizará los modelos de desvanecimiento de Rayleigh (NLOS) para el modelo A, y el desvanecimiento Rician (LOS) para el modelo B. El modelo A se utilizará para 802.11n. El mismo consta de un solo tap. El modelo B se utilizará para 802.11ac. El mismo utiliza selectivos en frecuencia. Estas condiciones permiten representar los escenarios de forma satisfactoria, además que permiten que las simulaciones no se extiendan demasiado.
- Se utilizarán los modelos expuestos en 3.4 y 3.5 para modelar los estándares 802.11n y 802.11ac respectivamente.
- El número de usuarios para ambos estándares es uno.
- Se establece un máximo de 3 flujos espaciales, tanto por STA como por AP.
- Se emplea anchos de banda de 40 MHz (802.11n) y 80 MHz (802.11ac).
- Los valores de MCS están en el rango de 0 a 9.
- Los intervalos de guarda son cortos (3,6 μ s) para ambos estándares.

3.6.2 Estructura del programa

La estructura de los programas (modelo A y B) básicamente es la misma, y viene representada por el diagrama de flujo que se muestra en la figura 58. Las funciones que se utilizan para el estándar 802.11n, y el orden en el que se ejecutan, vienen dadas por la figura 59. Las

funciones que se utilizan para el estándar 802.11ac, y el orden en el que se ejecutan, vienen dadas por la figura 60.

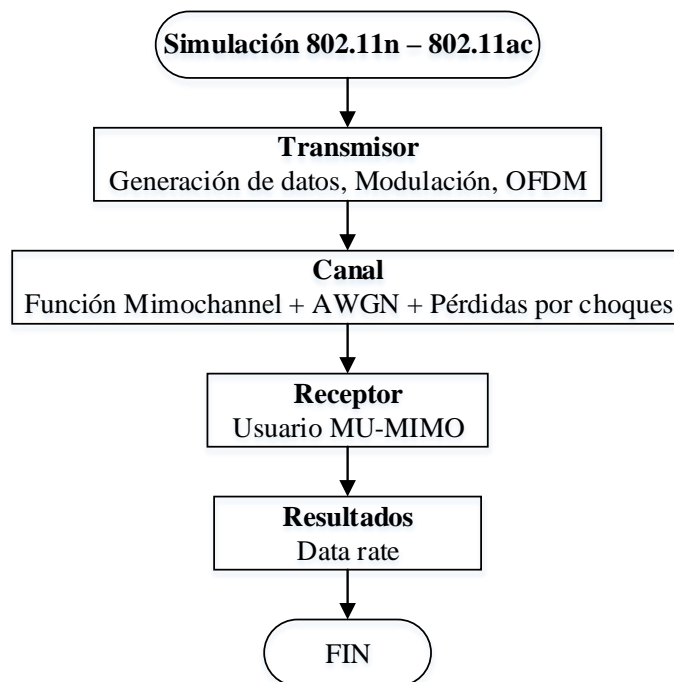


Figura 58. Diagrama de flujo para las simulaciones

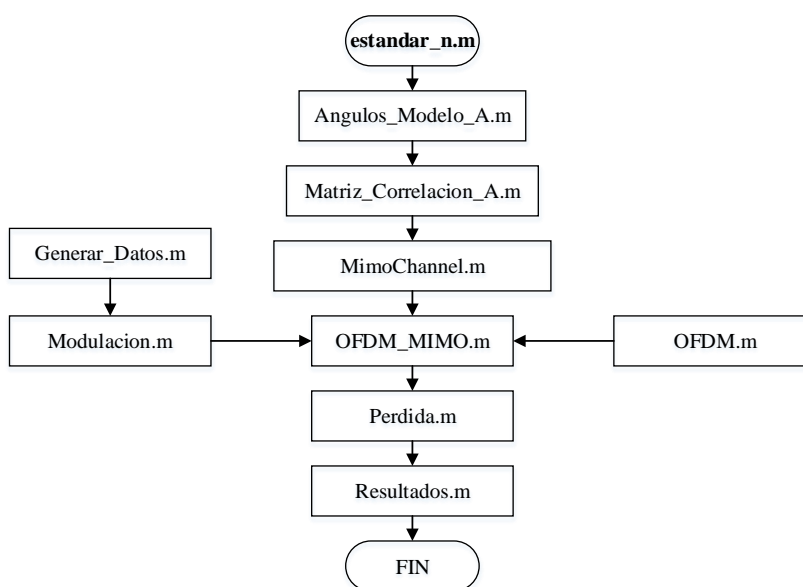


Figura 59. Diagrama de flujo del estándar 802.11n

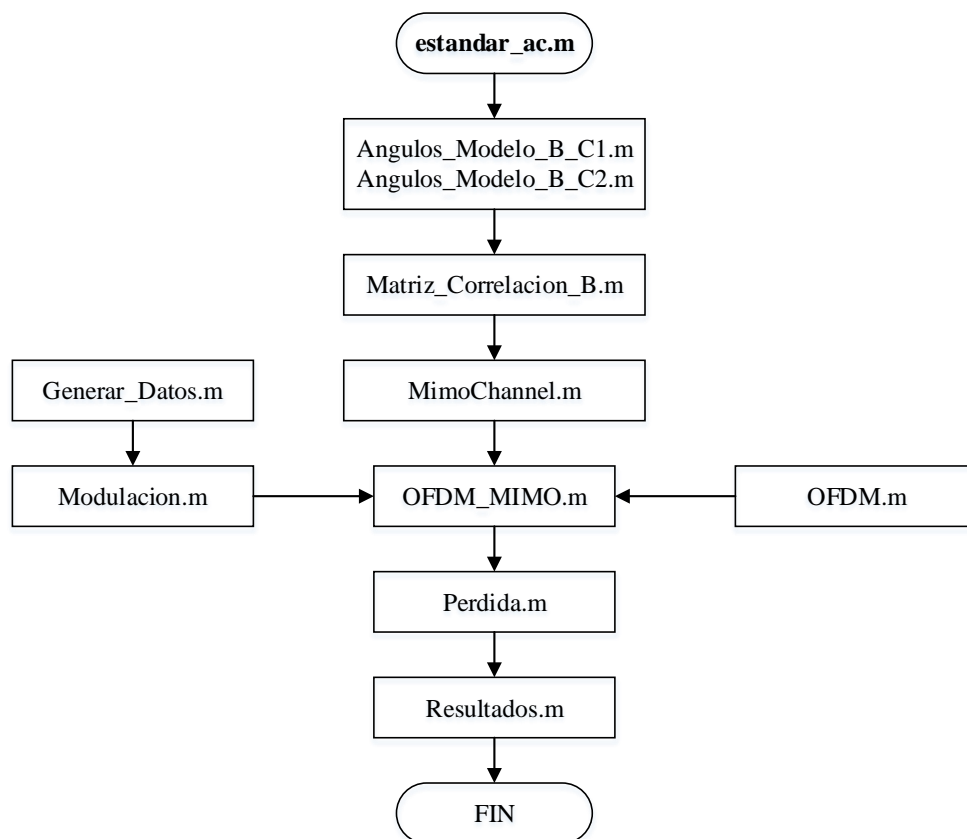


Figura 60. Diagrama de flujo del estándar 802.11ac

3.6.2.1 Función estandar_n

```

[OFDM_1] = OFDM();%Llamada función OFDM
[TxCorrelationMatriz_1_1] = Matriz_Correlacion_A();%Llamada función
Matriz_Correlacion_Modelo_A
[H_Modelo_A_1] = MimoChannel();%Llamada función Modelo_A MimoChannel
[Datos_RX_1] = Generar_Datos();%Llamada función Generar_Datos
[Datos_Mod_1] = Modulacion();%Llamada función Modulación
[Y_MIMO_1] = OFDM_MIMO();%Llamada función OFDM_MIMO
[AoA_ModeloA,AoD_ModeloA] = Angulos_Modelo_A();%Llamada función
Angulos_Modelo_A
[Y_MIMO_Perdida_1] = Perdida();%Llamada función Perdida
[Data_rate,C,E] = Resultados();%Llamada función Resultados
  
```

Figura 61. Función estandar_n

Esta función permite el ingreso de los siguientes parámetros: número de usuarios, número de antenas en el transmisor y receptor, valor del esquema de codificación y modulación equivalente

según anexo 3, modulación utilizada, intervalo de guarda, relación señal a ruido, número de choques de la señal y ancho de banda del canal. De igual forma la función llama a las siguientes funciones: OFDM.m, Matriz_Correlacion_A.m, Modelo_A_MimoChannel.m, Generar_Datos.m, Modulacion.m, OFDM_MIMO.m, Perdida.m y Resultados.m.

3.6.2.2 Función Angulos_Modelo_A

```
AoA_Modelo_A = [45]; %angulo AoA en 802.11n para un solo usuario definido en
el modelo A
AoD_Modelo_A = [45]; %angulo AoD en 802.11n para un solo usuario definido en
el modelo A
```

Figura 62. Función Angulos_Modelo_A

Esta función genera los ángulos AoA y AoD para el modelo A. Los valores vienen establecidos en el anexo 1.

3.6.2.3 Función OFDM

```
OFDM_1 =comm.OFDMModulator('FFTLength',128,'NumGuardBandCarriers',[7;7],...
    'PilotInputPort',true,'PilotCarrierIndices',[11;39;53;75;89;117],...
    'CyclicPrefixLength',0,'NumSymbols',1,'NumTransmitAntennas',TX);
Info_OFDM_1=info(OFDM_1);
NDatos = Info_OFDM_1.DataInputSize(1); % Valor de subportadoras de datos
NOFDM = Info_OFDM_1.OutputSize(1); % Valor de subportadoras salida OFDM
usuario 1
```

Figura 63. Función OFDM para 802.11n

```
OFDM_1 =comm.OFDMModulator('FFTLength',256,'NumGuardBandCarriers',[7;7],...
    'PilotInputPort',true,'PilotCarrierIndices',[25;63;89;117;139;167;203;231],..
    ..
    'CyclicPrefixLength',0,'NumSymbols',1,'NumTransmitAntennas',TX);
Info_OFDM_1=info(OFDM_1);
NDatos = Info_OFDM_1.DataInputSize(1); % Valor de subportadoras de datos
NOFDM = Info_OFDM_1.OutputSize(1); %Número de subportadoras OFDM que se
envían al usuario
```

Figura 64. Función OFDM para 802.11ac

Esta función simula la modulación OFDM a través de la función propia de Matlab `comm.OFDMModulator`, la cual depende del ancho de banda del canal y del número de antenas de la STA. La estructura de la función es la misma para ambos estándares, cambiando los valores de los parámetros dependiendo de la Función `OFDMModulator`.

3.6.2.3.1 Función `OFDMModulator`

Esta función simula OFDM, siendo su salida una representación de una señal modulada. Los parámetros de la función son los siguientes:

- `FFTLength`. Especifica el número de subportadoras.
- `NumGuardBandCarriers`. Número de subportadoras de banda de guarda.
- `PilotInputPort`. Propiedad lógica que controla si se permite especificar los índices de subportadoras piloto.
- `PilotCarrierIndices`. Si el parámetro `PilotInputPort` es `true`, este parámetro permite especificar los índices de las subportadoras piloto.
- `CyclicPrefixLength`. Propiedad que especifica la longitud del prefijo cíclico OFDM.
- `NumSymbols`. Propiedad que especifica el número de símbolos.
- `NumTransmitAntennas`. Propiedad que determina el número de antenas usadas para transmitir la señal modulada.

Los parámetros que utiliza la función se muestran en la Tabla 14. Los valores de la tabla dependen únicamente del ancho de banda del canal.

Tabla 14*Parámetros para la función OFDMModulator*

Parámetro\Ancho de banda	40 MHz	80 MHz
FFTLenght	128	256
NumGuardBandCarriers	[7;7]	[7;7]
PilotInputPort	True	True
PilotCarrierIndices	[11;39;53;75;89;117]	[25;63;89;117;139;167;203;231]
CyclicPrefixLength	0	0
NumSymbols	1	1
NumTransmitAntennas	Depende de TX	Depende de TX

Fuente: (MathWorks, 2014)

3.6.2.4 Función Generar_Datos

```
rng default; %setea a su valor por defecto a la función randi
Datos_RX_1 = randi([0 Mod-1],Ntramas*NDatos,1,RX_1);% Genera datos
```

Figura 65. Función Generar_Datos

Esta función genera la información que será enviada al usuario. Lo realiza mediante la siguiente instrucción:

$$\text{Datos_RX_1} = \text{randi}([0 \text{ Mod}-1], 1, \text{Ntramas} * \text{NDatos}, \text{RX_1})$$

Donde:

- randi. Función de Matlab para generar matrices de datos de forma aleatoria
- [0 Mod-1]. Se generan datos aleatorios que tienen un valor desde 0 hasta Mod-1.
- Ntramas. Número de tramas. Para la simulación es 500.
- NDatos. Este valor se obtiene de la función OFDM_40, el cual es el número de suportadoras.
- 1. Es el número de filas de la matriz.

- $N_{tramas} * N_{datos}$. Es el número de columnas de la matriz.
- RX_1 . Número de antenas en la STA. Es el número de matrices que se van a generar con los parámetros anterior.

La estructura de la función `Generar_Datos` es la misma para ambos estándares, cambiando los valores de los parámetros dependiendo de las funciones OFDM, `estandar_n` y `estandar_ac`, respectivamente.

3.6.2.5 Función Modulación

```
Datos_Mod = qammod(Datos_RX_1(:),Mod); %Se modula los datos del usuario
Datos_Mod_1 = reshape(Datos_Mod,Ntramas*Ndatos,1,RX_1) %Reordena los datos
```

Figura 66. Función Modulación

Esta función modula en amplitud de cuadratura a través de la función propia de Matlab `qammod`. Lo realiza mediante la siguiente instrucción:

$$\text{Datos_Mod_1} = \text{qammod}(\text{Datos_RX_1}(:), \text{Mod})$$

Donde:

- `Datos_RX_1(:)`. Datos generados por la función `Generar_Datos.m`
- `Mod`. Orden de la modulación

La función `reshape` ordena los datos modulados en las matrices correspondientes a cada antena. La estructura de la función `Modulacion` es la misma para ambos estándares, cambiando los valores de los parámetros dependiendo de las funciones OFDM, `Generar_Datos`, `estandar_n` y `estandar_ac`, respectivamente.

3.6.2.6 Función Matriz_Correlacion_A

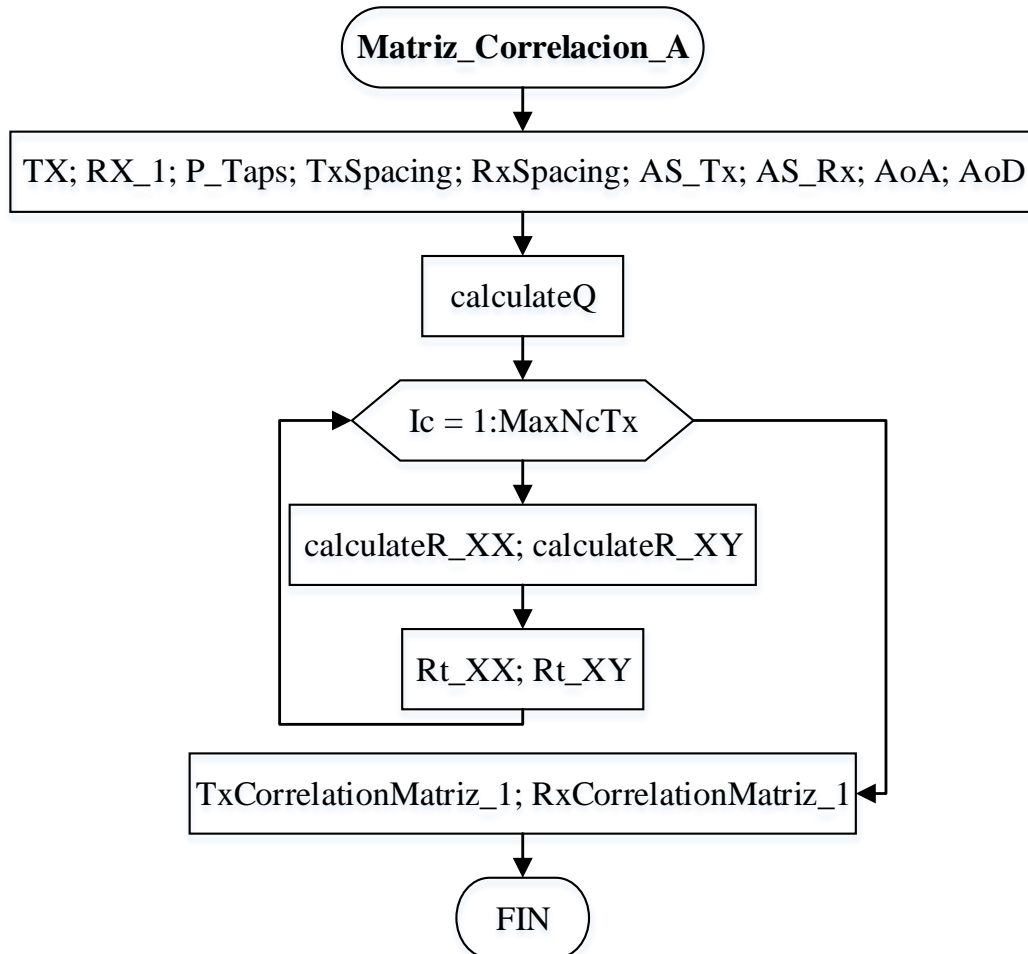


Figura 67. Diagrama de flujo de la función Matriz_Correlacion_A

```

for ip = 1:Np %Se ejecuta desde 1 hasta el número de rutas
% Cálculo de la matriz de correlación en el transmisor
Rt_XX = zeros(1, TX); %Crea una matriz de ceros de 1 x TX
Rt_XY = zeros(1, TX); %Crea una matriz de ceros de 1 x TX
phi0Tx = AoD(:,ip) * pi/180;
sigmaTx = ASTx(:, ip) * pi/180;
delta_theta = 180 * pi/180;
QTx = calculateQ(NcTx(ip), P_Taps(ip), sigmaTx, delta_theta); %Llama a la
función CalculateQ para la transmisión
for ic = 1:MaxNcTx
    if validClustersTx(ic, ip) == 1 % Chequeo del cluster.
  
```

CONTINÚA →


```

    if NcTx(ip) == 1
        iq = 1;
    else
        iq = ic;
    end
    Rt_XX = Rt_XX + QTx(iq) * calculateR_XX(TX, TxSpacing,
sigmaTx(ic), phi0Tx(ic), delta_theta);%Correlación cruzada de la parte real
de la i-esima y j-esima antenas de transmisión
    Rt_XY = Rt_XY + QTx(iq) * calculateR_XY(TX, TxSpacing,
sigmaTx(ic), phi0Tx(ic), delta_theta);%Correlación cruzada de la parte
imaginaria de la i-esima y j-esima antenas de transmisión
    end
end
TxCorrelationMatriz_1(:, :, ip) = toeplitz(Rt_XX + sqrt(-1)* Rt_XY);
%Matriz Correlación Transmisor
for it = 1:TX
    TxCorrelationMatriz_1(it, it, ip) = 1; %Matriz Correlación Transmisor
end
% Cálculo de la matriz de correlación en el receptor
Rr_XX = zeros(1, RX_1); %Matriz de ceros, según las antenas usuario
Rr_XY = zeros(1, RX_1); %Matriz de ceros, según las antenas usuario

phi0Rx = AoA(:, ip) * pi/180;
sigmaRx = ASRx(:, ip) * pi/180;

QRx = calculateQ(NcRx(ip), P_Taps(ip), sigmaRx, delta_theta);%Llama a la
función CalculateQ para la recepción
for ic = 1:MaxNcRx
    if validClustersRx(ic, ip) == 1 %chequeo del cluster.
        if NcRx(ip) == 1
            iq = 1;
        else
            iq = ic;
        end
        Rr_XX = Rr_XX + QRx(iq) * calculateR_XX(TX, RxSpacing,
sigmaRx(ic), phi0Rx(ic), delta_theta);%Correlación cruzada de la parte real
de la i-esima y j-esima antenas de recepción
        Rr_XY = Rr_XY + QRx(iq) * calculateR_XY(TX, RxSpacing,
sigmaRx(ic), phi0Rx(ic), delta_theta);%Correlación cruzada de la parte
imaginaria de la i-esima y j-esima antenas de recepción
    end
end
RxCorrelationMatriz_1(:, :, ip) = toeplitz(Rr_XX + sqrt(-1)* Rr_XY);
%Matriz Correlación Receptor
for ir = 1:RX_1
    RxCorrelationMatriz_1(ir, ir, ip) = 1; %Matriz Correlación Receptor
end
end
end

```

Figura 68. Función Matriz_Correlacion_A

Esta función genera la matriz de correlación tanto para el transmisor como para el receptor. El diagrama de flujo de la función se muestra en la figura 67. Los parámetros de los que depende esta función son los siguientes:

- TX. Número de antenas del transmisor.
- RX_1. Número de antenas del receptor.
- P_Taps. Potencia de los taps de los clusters.
- TxSpacing. Separación entre las antenas transmisoras.
- RxSpacing. Separación entre las antenas receptoras.
- AS_Tx. Angular Spread para el transmisor.
- AS_Rx. Angular Spread para el receptor.

3.6.2.7 Función MIMOChannel

```
H_Modelo_A_1 =
comm.MIMOChannel('SampleRate',sr,'PathDelays',tau,'AveragePathGains',pdb,'FadingDistribution',m,...
'MaximumDopplerShift',fd,'TransmitCorrelationMatrix',TxCorrelationMatriz_1,
...
'ReceiveCorrelationMatrix',RxCorrelationMatriz_1,'PathGainsOutputPort',true)
;
% Formación matriz MU-MIMO.
H MIMO MULTIUSUARIO ={H_Modelo_A_1};
```

Figura 69. Función MIMOChannel

La estructura de la función Modulación es la misma para ambos estándares, cambiando los valores de los parámetros dependiendo de los valores establecidos y de las funciones Matriz_Correlacion_A, Matriz_Correlacion_B, respectivamente. La función MIMOChannel ejecuta la función propia de Matlab comm.MIMOChannel, la cual permite simular una la transmisión de una señal a través un canal MIMO, el cual tiene un desvanecimiento Rayleigh o

Rician, y emplea el modelo Kronecker para modelar la correlación espacial entre los enlaces. Los parámetros para configurar esta función son los siguientes:

- `SampleRate`. Especifica la velocidad de muestreo de la señal de entrada, en Hz.
- `PathDelays`. Especifica los retrasos de los flujos discretos en segundos. Cuando se establece el parámetro como un escalar, el canal MIMO es de frecuencia plana. Cuando se establece el parámetro como un vector, el canal MIMO es de frecuencia selectiva. Sus posibles valores se los puede apreciar en los anexos 1 y 2.
- `AveragePathGains`. Especifica la ganancia promedio de los flujos discretos en dB. Puede tomar valores de 0 a -20 dB.
- `FadingDistribution`. Especifica el desvanecimiento del canal como Rayleigh o Rician.
- `MaximumDopplerShift`. Especifica el desplazamiento Doppler máximo para todos los flujos en Hz. Su valor es 0 cuando no existe movimiento del transmisor o del receptor.
- `TransmitCorrelationMatrix`. Especifica la correlación espacial para el transmisor.
- `ReceiveCorrelationMatrix`. Especifica la correlación espacial para el receptor.
- `PathGainsOutputPort`. Habilita la ganancia de salida del flujo, siempre y cuando su valor sea True.

3.6.2.8 Función OFDM_MIMO

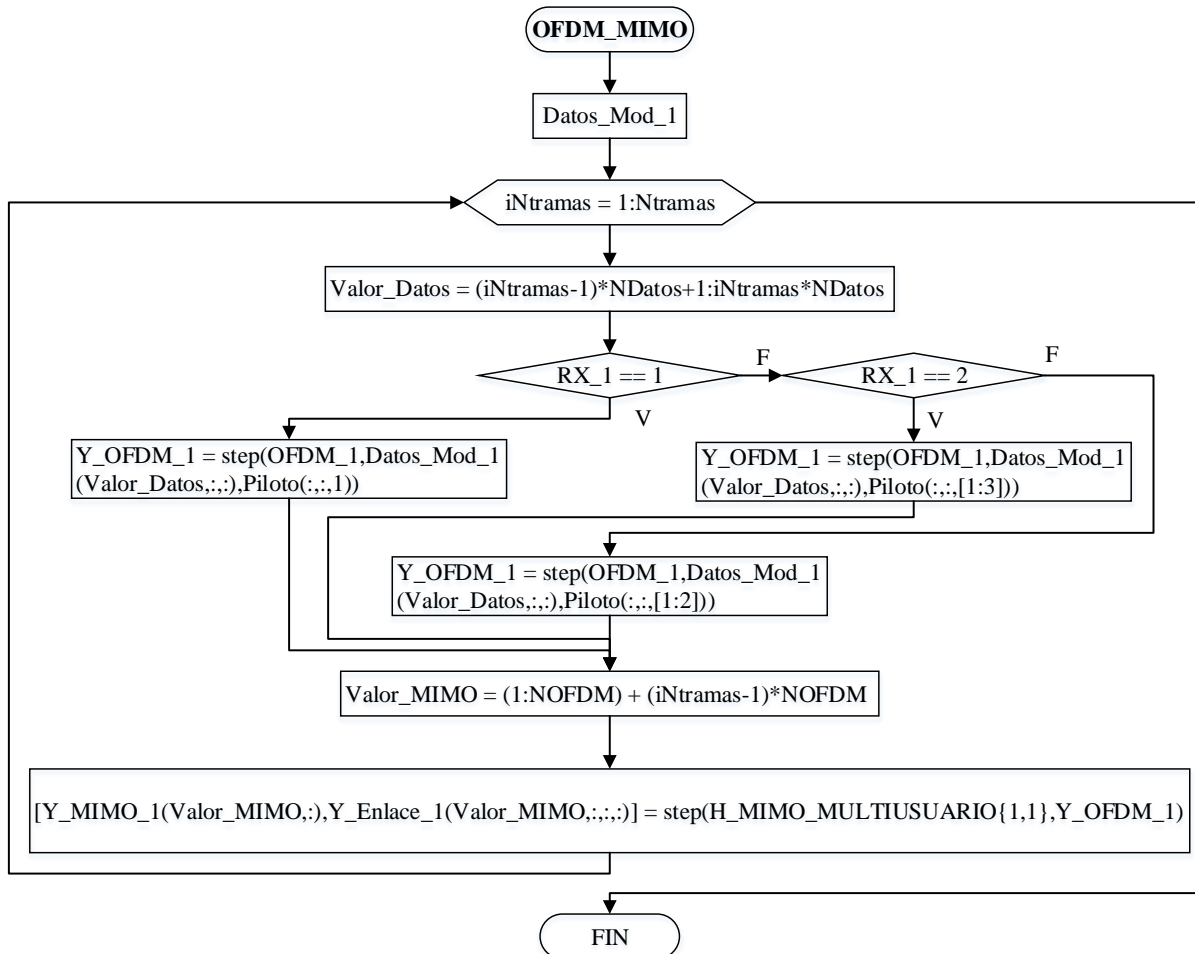


Figura 70. Diagrama de flujo de la función OFDM_MIMO

```

for iNtramas = 1:Ntramas
    Valor_Datos = (iNtramas-1)*NDatos+1:iNtramas*NDatos;
    %Función que selecciona la cantidad de subportadoras piloto para las
    %antenas del usuario 1.
    if RX_1==1
        Y_OFDM_1 = step(OFDM_1, Datos_Mod_1(Valor_Datos, :, :), Piloto(:, :, 1));
    elseif RX_1==2
        Y_OFDM_1 =
        step(OFDM_1, Datos_Mod_1(Valor_Datos, :, :), Piloto(:, :, [1:2]));
    else
        Y_OFDM_1 =
        step(OFDM_1, Datos_Mod_1(Valor_Datos, :, :), Piloto(:, :, [1:3]));
    end
end
  
```

CONTINÚA →

```

        Valor_MIMO = (1: NOFDM) + (iNtramas-1)*NOFDM;
        [Y_MIMO_1(Valor_MIMO,:), Y_Enlace_1(Valor_MIMO, :, :, :)] =
step(H_MIMO_MULTIOUSUARIO{1,1}, Y_OFDM_1);
end

```

Figura 71. Función OFDM_MIMO

Esta función modula los datos de entrada en OFDM. Luego, dichos datos son ingresados al canal MIMO de forma independiente para cada usuario. La estructura de la función OFDM_MIMO es la misma para ambos estándares, cambiando los valores de los parámetros dependiendo de los valores establecidos y de las funciones OFDM, Generar_Datos, Modulacion, MimoChannel, estandar_n, estandar_ac, respectivamente.

3.6.2.9 Función Perdida

```

Y_MIMO_AWGN_1 = awgn(mag, SNR, 'measured'); %Canal con pérdidas debido a
ruido blanco gaussiano
if num_ch == 1
    nchoques=-pared;
else
    if num_ch == 2
        nchoques=-pared-madera;
    else
        if num_ch == 3
            nchoques=-pared-madera-metal;
            if num_ch == 4
                nchoques=-pared-madera-metal-vidrio;
            else
                nchoques=0;
            end
        end
    end
end
end
end
end
Y_MIMO_Perdida_1 = Y_MIMO_AWGN_1+nchoques; %canal con pérdidas debido a
%ruido blanco gaussiano y choques

```

Figura 72. Función Perdida

Esta función adiciona pérdidas debido a AWGN y debido a los choques de la señal con objetos al resultado obtenido de la función OFDM_MIMO. Se usa la función propia de Matlab

awgn, la cual utiliza el valor de SNR en dB. Los valores SNR se obtienen de la anexo 3, mientras que los valores por choques contra materiales se obtienen del anexo 4. La estructura de la función Perdida es la misma para ambos estándares, cambiando el valor obtenido de la misma dependiendo de las funciones estandar_n y estandar_ac.

3.6.2.10 Función Resultados

```
Ncbps = Nbpscs * NDatos; % Bits codificados por símbolo OFDM
Ndbps = Ncbps * Coding; % Multiplicación por valor de code rate.
% Bit rate/duración de símbolo (4*10^-6), Multiplicado por número de
antenas RX, Multiplicado por intervalo de guarda.
Data_rate = (Ndbps/(ig))*RX_1;
C = (BW*10^6)*log2(1 + (SNR));%Teorema de Shannon
E = Data_rate/(BW*10^6); % Eficiencia Espectral.
```

Figura 73. Función Resultados

La estructura de la función pérdida es la misma para ambos estándares. Esta función calcula los siguientes parámetros:

- Data Rate.

$$Ncbps_1 = Nbpscs * NDatos$$

$$Ndbps_1 = Ncbps_1 * Coding$$

$$Data_rate = \frac{Ndbps_1}{ig} * RX_1$$

Donde:

- NDatos. Número de subportadoras de datos.
- Nbpscs. Bits codificados por subportadora.
- Ncbps_1. Bits codificados por símbolo OFDM.

- Coding. Valor del code rate.
 - Ndbps_1. Bits de datos por símbolo OFDM.
 - RX_1. Número de antenas en el receptor.
 - ig. Intervalo de guarda.
 - Data_rate. Velocidad de transmisión.
- Capacidad del canal

$$C = BW * 10^6 * \log_2(1 + SNR)$$

Donde:

- C. Capacidad del canal.
 - BW. Ancho de banda del canal.
 - SNR. Relación señal a ruido.
- Eficiencia del canal

$$E = \frac{Data_rate}{BW}$$

Donde:

- E. Eficiencia del canal
- Data_rate. Velocidad de transmisión.
- BW. Ancho de banda

3.6.2.11 Función estandar_ac

```
[OFDM_1] = OFDM();%MISMA. Llamada función OFDM_80
[AoA_Modelo_B_C1,AoD_Modelo_B_C1] = Angulos_Modelo_B_C1();%Llamada función
Angulos_Modelo_B_80MHz_C1
[AoA_Modelo_B_C2,AoD_Modelo_B_C2] = Angulos_Modelo_B_C2();%Llamada función
Matriz_Correlacion_Modelo_B_80
[TxCorrelationMatriz_1, RxCorrelationMatriz_1] = Matriz_Correlacion_B();
[H_Modelo_B_1] = MimoChannel();%Llamada función Modelo_B_MimoChannel.
[Datos_RX_1] = Generar_Datos();%Llamada función Generar_Datos
[Datos_Mod_1] = Modulacion();%Llamada función Modulación
[Y_MIMO_1] = OFDM_MIMO();%Llamada función OFDM_MIMO
[Y_MIMO_Perdida_1] = Perdida();%Llamada función Perdida
[Data_rate,C,E] = Resultados();%Llamada función Resultados
```

Figura 74. Función estandar_ac

Esta función permite el ingreso de los mismos parámetros que la función estandar_n. Esta función llama a funciones que se utilizaron en la función estandar_n (OFDM, Generar_Datos, Modulacion, OFDM_MIMO) y tiene funciones nuevas (Angulos_Modelo_B_C1, Angulos_Modelo_B_C2, Matriz_Correlacion_B, Modelo_B_Mimochannel, Perdida, Resultados). A continuación se explica el funcionamiento de las funciones nuevas.

3.6.2.12 Función Angulos_Modelo_B_C1

```
AoA_Modelo_B_C1 = [4.3 4.3 4.3 4.3 4.3];% Ángulos definidos para 802.11ac
Modelo B Cluster 1
AoD_Modelo_B_C1 = [225.1 225.1 225.1 225.1 225.1];% Ángulos definidos para
802.11ac Modelo B Cluster 1
```

Figura 75. Función Angulos_Modelo_B_C1 caso 1

```
AoA_Modelo_B_C1 = [4.3 4.3 4.3 4.3 4.3 4.3 4.3 4.3 4.3 -1e+09 -1e+09 -1e+09
-1e+09 -1e+09 -1e+09 -1e+09 -1e+09];% Ángulos definidos para 802.11ac Modelo
B Cluster 1
AoD_Modelo_B_C1 = [225.1 225.1 225.1 225.1 225.1 225.1 225.1 225.1 225.1 -
1e+09 -1e+09 -1e+09 -1e+09 -1e+09 -1e+09 -1e+09 -1e+09];% Ángulos definidos
para 802.11ac Modelo B Cluster 1
```

Figura 76. Función Angulos_Modelo_B_C1 caso 2

Esta función genera los ángulos AoA y AoD del cluster 1 para el modelo B. Dichos valores vienen establecidos por el anexo 2. Se desarrollaron dos casos. Para el caso 1, se limitó el rango de funcionamiento en el rango donde existen valores reales para todos los parámetros. Para el caso 2, se utilizó todo el rango de valores dados por el anexo, utilizando valores muy bajos ($-1e+09$) para los campos donde no existe un valor para los parámetros AoA y AoD.

3.6.2.13 Función Angulos_Modelo_B_C2

```
AoA_Modelo_B_C2 = [118.4 118.4 118.4 118.4 118.4];% Ángulos definidos para
802.11ac Modelo B Cluster 2
AoD_Modelo_B_C2 = [106.5 106.5 106.5 106.5 106.5];% Ángulos definidos para
802.11ac Modelo B Cluster 2
```

Figura 77. Función Angulos_Modelo_B_C2 caso 1

```
AoA_Modelo_B_C2 = [-1e+09 -1e+09 -1e+09 -1e+09 118.4 118.4 118.4 118.4 118.4
118.4 118.4 118.4 118.4 118.4 118.4 118.4 118.4];% Ángulos definidos para
802.11ac Modelo B Cluster 2
AoD_Modelo_B_C2 = [-1e+09 -1e+09 -1e+09 -1e+09 106.5 106.5 106.5 106.5 106.5
106.5 106.5 106.5 106.5 106.5 106.5 106.5 106.5];% Ángulos definidos para
802.11ac Modelo B Cluster 2
```

Figura 78. Función Angulos_Modelo_B_C2 caso 2

Esta función genera los ángulos AoA y AoD del cluster q para el modelo B. Dichos valores vienen establecidos por el anexo 2. Se manejan 2 casos, tal como se explicó en la función Angulos_Modelo_C1.

3.6.2.14 Función Matriz_Correlacion_B

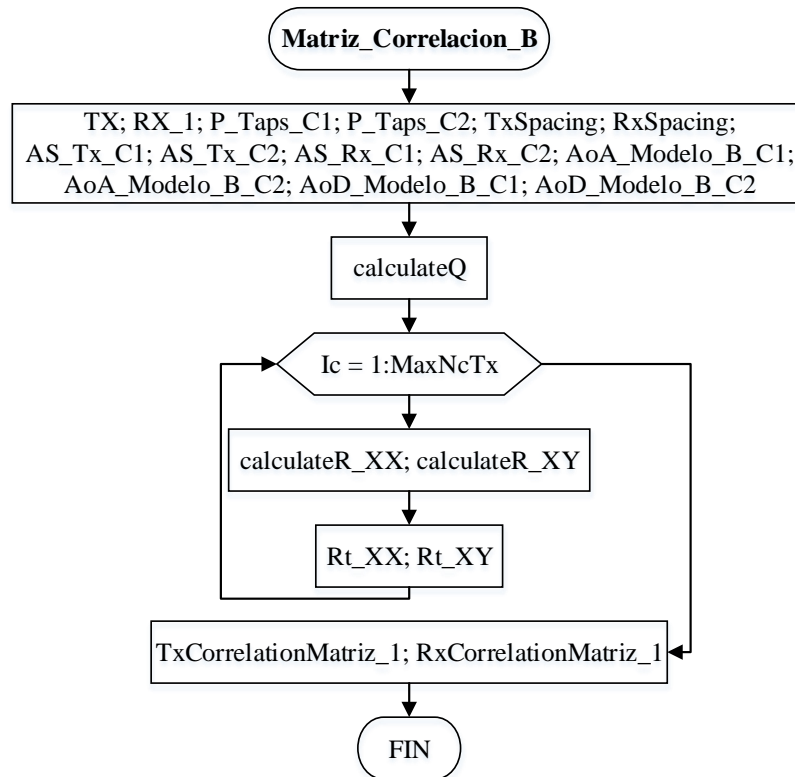


Figura 79. Diagrama de flujo de la función Matriz_Correlacion_B

```

for ip = 1:Np %Se ejecuta desde 1 hasta el número de rutas

% Cálculo de la matriz de correlación en el transmisor
Rt_XX = zeros(1, TX); %Crea una matriz de ceros de 1 x TX
Rt_XY = zeros(1, TX); %Crea una matriz de ceros de 1 x TX

phi0Tx = AoD(:,ip) * pi/180; %Toma toda la ip columna de AoD, *pi/180
sigmaTx = AS_Tx(:, ip) * pi/180; %Toma toda la ip columna de ASTx,
*pi/180
delta_theta = 180 * pi/180;

% Cálculo del coeficiente de normalización aproximado
QTx = calculateQ(NcTx(ip), P_Taps_C1(ip), P_Taps_C2(ip), sigmaTx,
delta_theta); %Llama a la función CalculateQ para la transmisión

for ic = 1:MaxNcTx
    if validClustersTx(ic, ip) == 1 % Chequeo del cluster
  
```

CONTINÚA →

```

    if NcTx(ip) == 1
        iq = 1; %Los elementos de la diagonal de la matriz son 1
    else
        iq = ic;
    end
    Rt_XX = Rt_XX + QTx(iq) * calculateR_XX(TX, TxSpacing,...
        sigmaTx(ic), phi0Tx(ic), delta_theta); %Parte real de los
coeficientes de la matriz de correlación
    Rt_XY = Rt_XY + QTx(iq) * calculateR_XY(TX, TxSpacing,...
        sigmaTx(ic), phi0Tx(ic), delta_theta); %Parte imaginaria de
los coeficientes de la matriz de correlacion
    end
end

TxCorrelationMatriz_1(:, :, ip) = toeplitz(Rt_XX + sqrt(-1)* Rt_XY);
%Colocación de los coeficientes en la matriz
for it = 1:TX
    TxCorrelationMatriz_1(it, it, ip) = 1; %Matriz Correlación Transmisor
end

% Cálculo de la matriz de correlación en el receptor
Rr_XX = zeros(1, RX_1); %Matriz de ceros, según las antenas usuario
Rr_XY = zeros(1, RX_1); %Matriz de ceros, según las antenas usuario

phi0Rx = AoA(:, ip) * pi/180;
sigmaRx = AS_Rx(:, ip) * pi/180;

% Cálculo del coeficiente de normalización aproximado.
QRx = calculateQ(NcRx(ip), P_Taps_C1(ip), P_Taps_C2(ip), sigmaRx,
delta_theta); %Llama a la función CalculateQ para la recepción

for ic = 1:MaxNcRx
    if validClustersRx(ic, ip) == 1 %Chequeo del cluster.
        if NcRx(ip) == 1
            iq = 1; %Los elementos de la diagonal de la matriz son 1
        else
            iq = ic;
        end
        Rr_XX = Rr_XX + QRx(iq) * calculateR_XX(TX, RxSpacing,...
            sigmaRx(ic), phi0Rx(ic), delta_theta); %Correlación cruzada
de la parte real de la i-esima y j-esima antenas de recepción
        Rr_XY = Rr_XY + QRx(iq) * calculateR_XY(TX, RxSpacing,...
            sigmaRx(ic), phi0Rx(ic), delta_theta); %Correlación cruzada
de la parte imaginaria de la i-esima y j-esima antenas de recepción
    end
end
RxCorrelationMatriz_1(:, :, ip) = toeplitz(Rr_XX + sqrt(-1)* Rr_XY);
%Colocación de los coeficientes en la matriz
for ir = 1:RX_1
    RxCorrelationMatriz_1(ir, ir, ip) = 1; %Matriz Correlación Receptor
end
end

```

Figura 80. Función Matriz_Correlacion_B

Esta función genera la matriz de correlación tanto para el transmisor como para el receptor. El diagrama de flujo de la función se muestra en la figura 79. Los parámetros de los que depende esta función son los siguientes:

- TX. Número de antenas del transmisor.
- RX_1. Número de antenas del receptor.
- P_Taps_C1. Potencia de los taps del cluster 1.
- P_Taps_C2. Potencia de los taps del cluster 2.
- TxSpacing. Separación entre las antenas transmisoras.
- RxSpacing. Separación entre las antenas receptoras.
- AS_Tx_C1. Angular Spread para el transmisor en el cluster 1.
- AS_Tx_C2. Angular Spread para el transmisor en el cluster 2.
- AS_Rx_C1. Angular Spread para el receptor en el cluster 1.
- AS_Rx_C2. Angular Spread para el receptor en el cluster 2.

3.7 Escenarios de prueba

Los escenarios propuestos en las condiciones para implementar la simulación permiten comparar el rendimiento entre ambos estándares. Ambos modelos y sus parámetros establecidos en dicha sección permiten obtener los siguientes resultados para cada estándar:

- Throughput.
- Capacidad del canal.
- Eficiencia del canal.
- Pérdidas en el canal.

CAPÍTULO IV

PRUEBAS PRÁCTICAS DE LOS ESTÁNDARES 802.11N Y 802.11AC

4.1 Equipos utilizados

Para realizar las pruebas prácticas se utilizará un access point y tarjetas de red en cada una de las STA que sean compatibles con 802.11n y 802.11ac.

4.1.1 Archer C7 AC1750 Wireless Dual Band Gigabit Router

El equipo va a hacer las veces de AP en los diferentes escenarios. Es de la marca TP-LINK.

Las características del equipo se presentan en la figura 81.

HARDWARE FEATURES	
Interface	4 10/100/1000Mbps LAN Ports 1 10/100/1000Mbps WAN Port
Button	2 USB 2.0 Port WPS/Reset Button Wireless On/Off Switch Power On/Off Button
External Power Supply	12VDC / 2.5A
Antenna type	Three 5GHz 5dBI detachable antennas (RP-SMA) Three 2.4GHz Internal antennas
WIRELESS FEATURES	
Wireless Standards	IEEE 802.11a/n/ac, 5GHz IEEE 802.11b/g/n, 2.4GHz
Frequency	2.4GHz and 5GHz
Signal Rate	5GHz: Up to 1300Mbps 2.4GHz: Up to 450Mbps
EIRP	<20dBm 5GHz 11a 6Mbps: -96dBm, 11a 54Mbps: -79dBm 11ac HT20: -71dBm, 11ac HT40: -66dBm, 11ac HT80: -63dBm
Reception Sensitivity	2.4GHz 11g 54M: -77dBm 11n HT20: -74dBm, 11n HT40: -72dBm
Wireless Functions	Enable/Disable Wireless Radio, WDS Bridge, WMM, Wireless Statistics
Wireless Security	WEP, WPA / WPA2, WPA-PSK / WPA2-PSK encryption

Figura 81. Características de router Archer C7 AC1750

El router utiliza los 802.11a/n/ac trabajando a 5 GHz, y 802.11b/g/n trabajando a 2,4 GHz. Las antenas para trabajar en 5GHz son externas, mientras que las antenas para trabajar en 2,4 GHz son internas. Su interfaz WAN trabaja hasta los 1000 Mbps. En 802.11ac, el equipo tiene características Wave1, siendo las características más importante que es un equipo SU-MIMO. La Tabla 15 muestra la comparación entre 802.11n y 802.11ac Wave 1, asumiendo que se tiene una eficiencia del 65% en la capa MAC con el más alto MCS.

Tabla 15

Comparación entre 802.11n y 802.11ac Wave 1

	802.11n	802.11ac Wave 1
Band	2,4 GHz & 5 GHz	5 GHz
MIMO	Single User (SU)	Single User (SU)
PHY Rate	600 Mbps	1,3 Gbps
Channel Width	20 or 40 MHz	20, 40, 80 MHz
Modulation	64 QAM	256 QAM
Spatial Strams	4	3
MAC Throughput	390 Mbps	845 Mbps

Fuente: (Cisco, 2018)

4.1.1.1 Configuración del Archer C7 AC1750 Wireless Dual Band Gigabit

Se accede vía a web al equipo a través de la puerta de enlace predeterminada. Se procede a configurar el equipo para que trabaje únicamente en 802.11n y 802.11ac, tal como se muestra en la figura 82 y la figura 83. Se configura también el nombre de la red a difundir, el estándar en el que se va a trabajar y el canal que se utilizará, tal como se muestra en la figura 84 y la figura 85. Para cada uno de las frecuencias, se configura el AP para que funcione a su máxima throughput, tal como se muestra en la figura 86 y la figura 87. Se configura un servidor DHCP para proveer de la configuración TCP/IP a las STAs en toda la LAN, tal como se muestra en la figura 88.

Dual Band Selection

This router supports dual band, please choose the frequency that you would like to work with:

- Concurrently with 2.4GHz and 5GHz (802.11a/b/g/n/ac)
- Only work in 2.4GHz (802.11b/g/n)
- Only work in 5GHz (802.11a/n/ac)

To turn off the wireless radio, you can switch the Wireless On/Off button located on

Figura 82. Configuración del AP en 802.11n

Dual Band Selection

This router supports dual band, please choose the frequency that you would like to work with:

- Concurrently with 2.4GHz and 5GHz (802.11a/b/g/n/ac)
- Only work in 2.4GHz (802.11b/g/n)
- Only work in 5GHz (802.11a/n/ac)

Figura 83. Configuración del AP en 802.11ac

Wireless Settings (2.4GHz)

Wireless Network Name: (Also called the SSID)

Mode:

Channel Width:

Channel:

Enable SSID Broadcast

Enable WDS Bridging

Figura 84. Configuración del AP en 2,4 GHz

Wireless Settings (5GHz)

Wireless Network Name: (Also called the SSID)

Mode:

Channel:

Enable SSID Broadcast

Enable WDS Bridging

Figura 85. Configuración del AP en 5 GHz

Wireless Advanced	
Transmit Power:	High
Beacon Interval :	100 (40-1000)
RTS Threshold:	2346 (1-2346)
Fragmentation Threshold:	2346 (256-2346)
DTIM Interval:	1 (1-255)
	<input checked="" type="checkbox"/> Enable WMM
	<input checked="" type="checkbox"/> Enable Short GI
	<input type="checkbox"/> Enable AP Isolation

Figura 86. Máximo rendimiento del AP en 2,4 GHz

Wireless Advanced	
Transmit Power:	High
Beacon Interval :	1000 (40-1000)
RTS Threshold:	2346 (1-2346)
Fragmentation Threshold:	2346 (256-2346)
DTIM Interval:	1 (1-255)
	<input checked="" type="checkbox"/> Enable WMM
	<input checked="" type="checkbox"/> Enable Short GI
	<input type="checkbox"/> Enable AP Isolation

Figura 87. Máximo rendimiento del AP en 5 GHz

DHCP Server:	<input type="radio"/> Disable <input checked="" type="radio"/> Enable
Start IP Address:	192.168.0.100
End IP Address:	192.168.0.199
Address Lease Time:	120 minutes (1~2880 minutes, the default value is 120)
Default Gateway:	192.168.0.1 (optional)
Default Domain:	(optional)
Primary DNS:	0.0.0.0 (optional)
Secondary DNS:	0.0.0.0 (optional)

Figura 88. Configuración del servidor DHCP en el AP

4.1.2 Archer T9E AC1900 Wireless Dual Band PCI Express

Es un equipo de la marca TP-LINK. La tarjeta va instalada en un PC. Se escogió esta tarjeta porque al momento no existen tarjetas de red para laptop que permitan alcanzar la velocidad de 1300 Mbps. Las principales características de la tarjeta se muestran en la figura 89.

Estándares Inalámbricos	IEEE 802.11ac, IEEE 802.11a, IEEE 802.11n, IEEE 802.11g, IEEE 802.11b
Frecuencia	5GHz 2.4GHz
Tasa de Señal	5GHz 11ac: Up to 1300Mbps(dinámico) 11a: Up to 54Mbps(dinámico) 2.4GHz 11n: Up to 600Mbps(dinámico) 11g: Up to 54Mbps(dinámico) 11b: Up to 11Mbps(dinámico)
Sensibilidad de Recepción	5GHz 11ac: Up to 1300Mbps(dinámico) 11a: Up to 54Mbps(dinámico) 2.4GHz 11n: Up to 600Mbps(dinámico) 11g: Up to 54Mbps(dinámico) 11b: Up to 11Mbps(dinámico)
Potencia de Transmisión	<20dBm (PIRE)
Modos Inalámbricos	Ad-Hoc / Modo infraestructura
Seguridad Inalámbrica	Soporta 64/128 bit WEP, WPA-PSK/WPA2-PSK, WPA/WPA2-Enterprise, 802.1x
Tecnología de Modulación	DBPSK, DQPSK, CCK, OFDM, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM

Figura 89. Características de la tarjeta Archer T9E AC1750

El equipo trabaja en 802.11a/ac para 5GHz y 802.11b/g/n para 2,4 GHz. Ya que las características del equipo son dinámicas, dependiendo de la negociación con el AP, el equipo alcanza su máximo throughput para cada estándar.

4.1.2.1 Configuración del Archer T9 AC1900 Wireless Dual Band PCI Express

El equipo utiliza parámetros dinámicos para alcanzar su máximo throughput, por lo que se debe configurar el equipo para forzarlo a que funcione a su mejor rendimiento. Debido a que no se puede configurar de forma directa los estándar 802.11n y 802.11ac, se debe de configurar algunos parámetros a su mayor capacidad.

- WMM. Responde a las siglas de Wi-Fi Multimedia, y su función es proporcionar calidad de servicios (QoS) a las aplicaciones multimedia y priorizar la transmisión de datos.

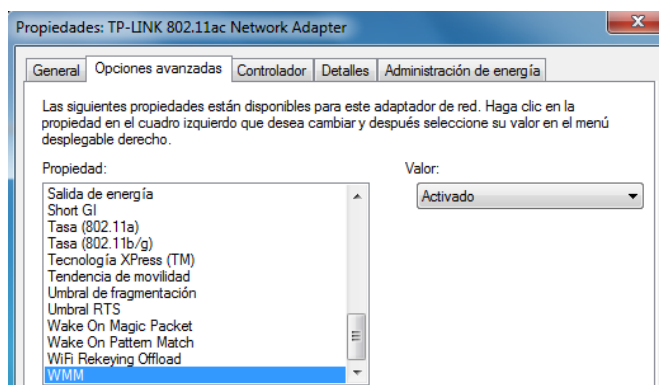


Figura 90. Configuración WMM

- Tecnología XPress (TM). Es un estándar Broadcom de transmisión de tramas por ráfagas para mejorar el rendimiento mediante un nuevo empaquetamiento de datos, el cual es encontrado en las especificaciones de extensiones multimedia wireless.

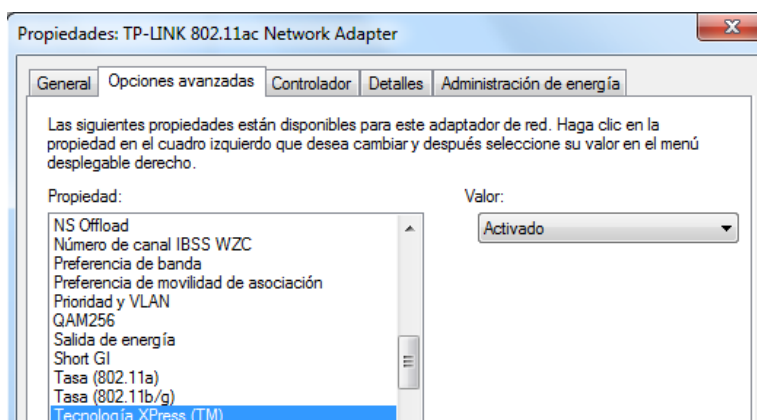


Figura 91. Configuración Tecnología XPress (TM)

A continuación se muestran las configuraciones del resto de parámetros.

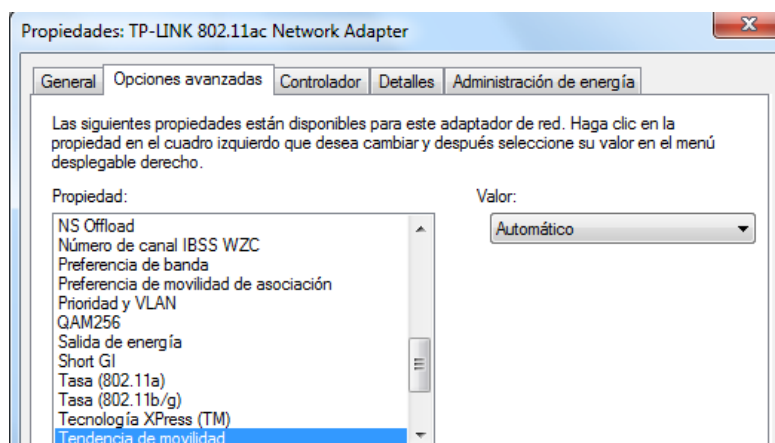


Figura 92. Tendencia de movilidad

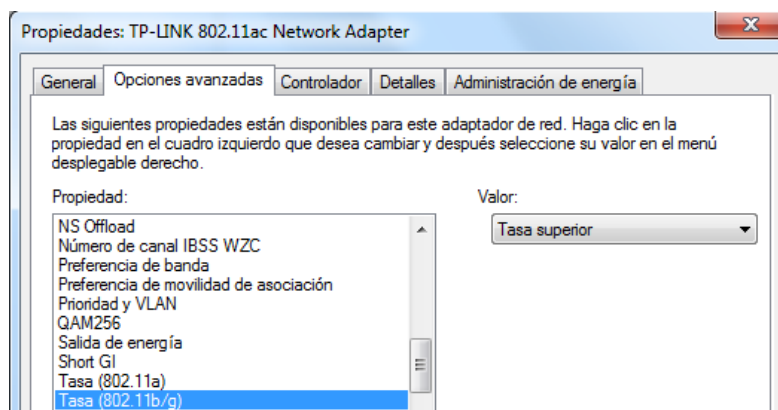


Figura 93. Configuración tasa (802.11b/g)

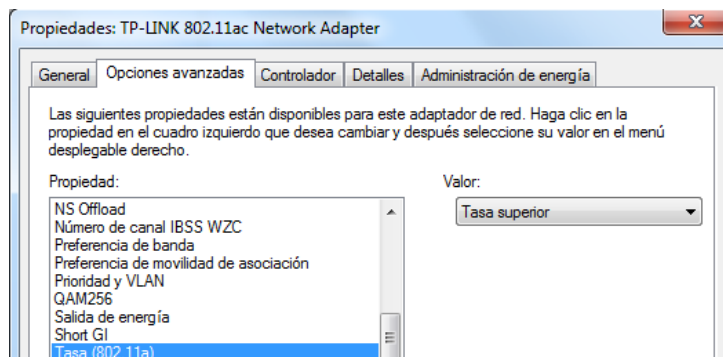


Figura 94. Configuración tasa (802.11a)

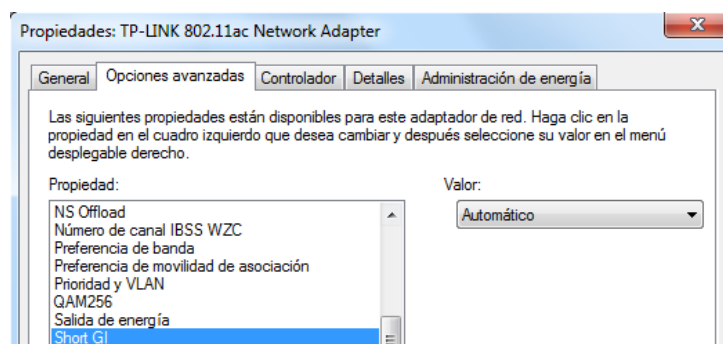


Figura 95. Configuración short GI

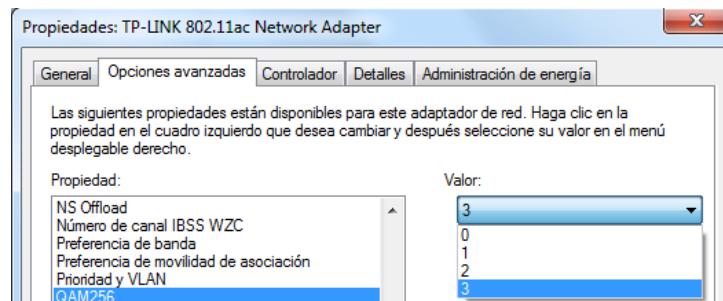


Figura 96. Configuración QAM256

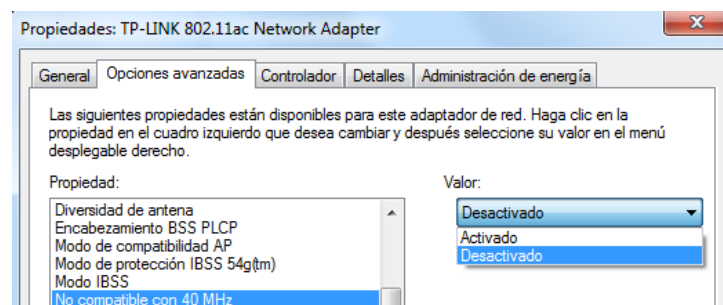


Figura 97. Configuración compatible 40 MHz

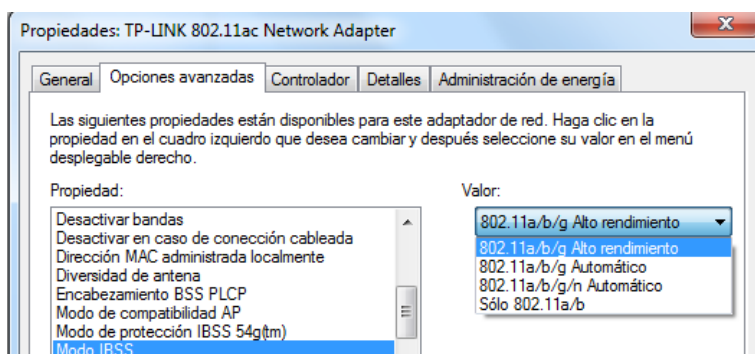


Figura 98. Configuración modo IBSS

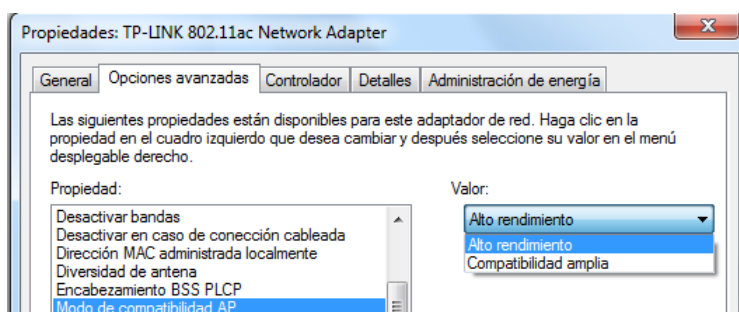


Figura 99. Configuración compatibilidad AP

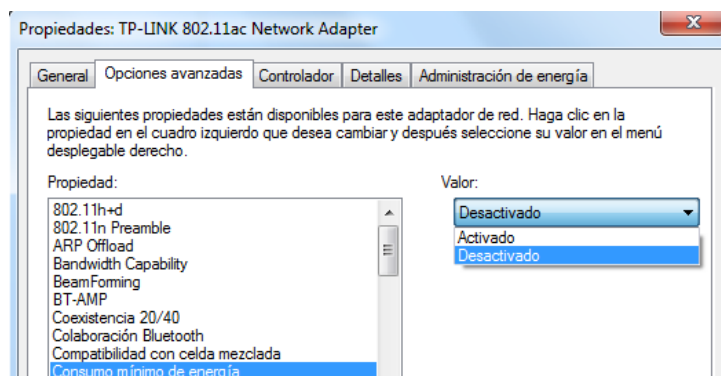


Figura 100. Configuración consumo de energía

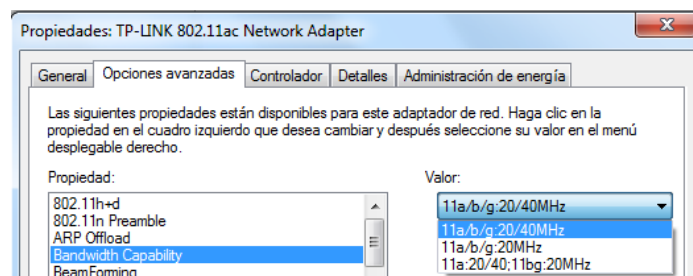


Figura 101. Configuración Bandwidth Capability

4.1.3 Dual Band Wireless AC 7260

El equipo es de la marca Intel. La tarjeta va instalada en una laptop. Las características de la tarjeta se muestran en la figura 102.

Intel® Dual Band Wireless-AC 7260 Technical Specifications	
General	
Dimensions (H x W x D)	HMC: 26.80 mm x 30 mm x 2.4 mm Max (Top Side) / 1.35 mm Max (Bottom Side) Single Sided M.2 2230: 22 mm x 30 mm x 2.4 mm [1.5mm Max (Top Side)/ 0.1mm Max (Bottom Side)] M.2 2226: 22 mm x 26 mm x 2.4 mm [1.5mm Max (Top Side)/ 0.1mm Max (Bottom Side)]
Weight	HMC: 3.0g M.2 2230: 2.3g M.2 2226: 2.2g
Diversity	Supported
Radio ON/OFF Control	Supported in both hardware and software
Connector interface	HMC: PCIe, USB M.2: PCIe, USB
LED Output	On/Off
Operating Temperature (Adapter Shield)	0° to +80° C
Humidity Non-Operating	50% to 90% RH non-condensing (at temperatures of 25°C to 35°C)
Operating Systems	Microsoft Windows* 7, Microsoft Windows* 8.1, Linux* (most features not available on Linux)
Wi-Fi Alliance	Wi-Fi CERTIFIED* a/b/g/n/ac, WMM*, WMM-PS*, WPA*, WPA2*, and WPS2*, Protected Management Frames, Wi-Fi Direct* for peer to peer device connections, Wi-Fi Miracast* as Source.
IEEE WLAN Standard	IEEE 802.11abgn, 802.11ac, 802.11d, 802.11e, 802.11i, 802.11h, 802.11w
Architecture	Infrastructure and SoftAP; Supports simultaneous Client and SoftAP modes
Roaming ^a	Supports seamless roaming between respective access points (802.11b, 802.11g, 802.11a/b/g, 802.11a/b/g/n, and 802.11ac)
Bluetooth [®]	Dual Mode Bluetooth* 2.1, 2.1+EDR, 3.0, 3.0+HS, 4.0 (BLE)

Figura 102. Características de la tarjeta PCIe AC 7260

El equipo trabaja en 802.11a/b/g/n y 802.11ac. Utiliza dos antenas, las cuales van de forma interna en la laptop, permitiéndole utilizar un arreglo de 2x2. El ancho de banda máximo en el que trabaja el equipo es de 80 MHz.

4.1.3.1 Configuración del Dual Band Wireless AC 7260

Una de las razones por las cuales se escogió esta tarjeta fue que su configuración es muy similar a las de la tarjeta Archer C7 AC1750, debido a que utiliza casi los mismos parámetros, lo cual evita tener problemas de compatibilidad entre equipos, especialmente con el AP. En la siguiente figura se muestra la configuración de un parámetro extra que maneja esta tarjeta.

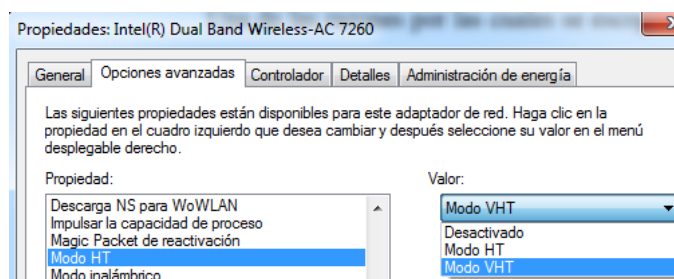


Figura 103. Modo HT

4.1.4 Equipos finales

Los host o STA utilizados para los diferentes escenarios son una laptop y una desktop. Las características de los mismos se muestran en la tabla

Tabla 16

Características de los host

Host	Tipo	S.O.	Procesador	Memoria RAM
STA1	Laptop	Windows 7 64 bits	Intel(R) Core(TM) i5-2430M @ 2,4 GHz	6 GB
STA2	Desktop	Windows 7 64 bits	Pentium(R) Dual-Core CPU E5200 @ 2,5 GHz	4 GB

4.2 Programas utilizados

A continuación se detallan los programas utilizados para realizar las pruebas.

4.2.1 iPerf

Es una herramienta para pruebas de velocidad para los protocolos TCP, UDP y SCTP, mediante la variación de tiempo, buffer y e internos de los protocolos antes mencionados. Los

reportes de la red IP evaluada vienen en base a velocidad, ancho de banda, pérdidas y otros parámetros. A continuación se detallan las características del programa.

- TCP y SCTP.
 - Mide ancho de banda.
 - Reporta el tamaño MSS/MTU y tamaños de lectura.
 - Soportado para el tamaño de la ventana TCP a través de los sockets de los buffers.
- UDP.
 - El cliente puede crear cadenas UDP para un ancho de banda específico.
 - Mide pérdida de paquetes.
 - Mide retardo y jitter.
- Compatible con Windows.
- El cliente (opción -c) y el servidor (opción -s) pueden tener conexiones simultáneas múltiples (opción -P).
- Ejecutar en un tiempo específico (opción -t).
- Reporte periódico, ancho de banda intermedio, jitter y reporte de pérdidas en un intervalo específico (opción -i).
- Establecer de un ancho de banda específico para TCP y UDP (opción -b).
- Establecer un tamaño específico para el buffer (opción -w).
- Establecer tamaño del bloque (opción -l).
- Permite utilizar como servidor uno local o alguno publicado en internet.

4.2.2 Acrylic WiFi

Es un conjunto de aplicaciones que permiten escanear las redes Wi-Fi análisis de cobertura y seguridad en tiempo real. Para las pruebas se utilizan dos aplicaciones, las cuales se detallan a continuación.

- Acrylic WiFi profesional. Permite analizar el estado de la red Wi-Fi (RSSI, SNR, velocidad) de forma numérica y gráfica. Permite visualizar los dispositivos conectados a la red, descubrir rogue APs, canales disponibles y configuraciones erróneas del AP. Tiene un sniffer integrado y realiza reportería.
- Acrylic Wi-Fi Heatmaps. Realiza análisis wifi sin necesidad de hardware adicional. Importa planos o usa planos online. Permite visualizar mapas de cobertura y calor. Realiza reportería.

4.3 Topología

Todos los escenarios utilizan la topología mostrada en la figura 104, con algunas variantes, dependiendo la función que va a cumplir cada uno de los equipos.

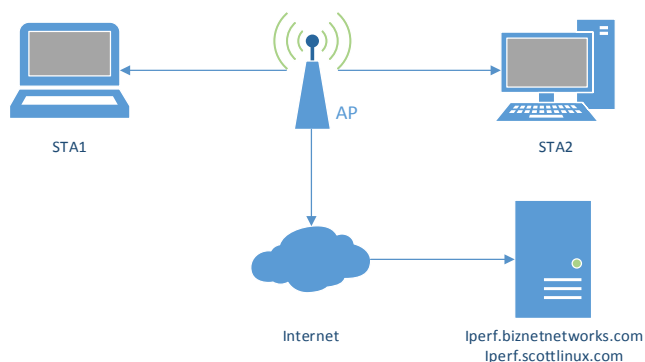


Figura 104. Topología para las pruebas

Tabla 17*Direccionamiento de la topología*

Host	Interfaz	Dirección IP	Máscara de red	Gateway
STA1	WLan	192.168.0.100	255.255.255.0	192.168.0.1
STA2	WLan	192.168.0.101	255.255.255.0	192.168.0.1
AP	WLan1	192.168.0.1	255.255.255.0	N/A
	WLan2	192.168.0.1	255.255.255.0	N/A
	WAN	iperf.biznetnetworks.com	N/A	N/A
	WAN	iperf.scottlinux.com	N/A	N/A

La STA1 corresponde a la laptop, mientras que la STA2 corresponde al desktop. Se debe tener en cuenta que el AP tiene su salida al internet a través de una interfaz 10/100/1000 Mbps, y se utiliza un cable Giga Ethernet, por lo que físicamente la velocidad máxima en este caso sería de 1000 Mbps. Dependiendo el escenario se utilizará la interfaz WLan1 (802.11n) o la interfaz WLan2 (802.11ac). Las dos interfaces no estarán activas de forma simultánea para evitar cualquier problema al tomar las medidas de los parámetros. De igual forma se utilizan servidores online como parte de otros escenarios de prueba.

4.4 Escenarios de prueba

El conjunto de pruebas y escenarios presentados en este capítulo permiten determinar el rendimiento de cada uno de los estándares, compararlos entre sí y con sus respectivas simulaciones.

Los escenarios tienen las siguientes características:

- Modelo: cliente-servidor.
- Tipos de ambiente: interno.
- Modo de operación: tipo infraestructura.
- Seguridad: WPA- PSK con AES para ambos estándares.

- Direccionamiento lógico: a través de un servidor DHCP levantado en el AP.
- Cuando el servidor es STA2 y el cliente es STA1, o viceversa, cada una de las STA se encuentra a una distancia del AP de entre 1 a 2 metros, aproximadamente.
- Ocho escenarios para cada estándar, los cuales están de forma general en función de las variables que se muestran en la tabla

Tabla 18*Escenarios de simulación*

Escenario	Cliente	Servidor	Protocolo	# de líneas
1	STA1	STA2	TCP	1
2	STA1	STA2	TCP	10
3	STA2	STA1	TCP	1
4	STA2	STA1	TCP	10
5	STA1	URL	TCP	1
6	STA2	URL	TCP	1
7	STA1	STA2	UDP	1
8	STA2	STA1	UDP	1

Además de estos 8 escenarios se tiene 2 extras en los cuales se realizan los mapas de calor respectivos de cada estándar.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Resultados simulación

5.1.1 Simulación modelo A

Para el modelo A, los datos de simulación son los siguientes: 802.11n, desvanecimiento Rayleigh (NLOS), una STA con dos antenas, un AP con dos antenas, ancho de banda de 40 MHz, intervalo de guarda corto (3,6 μ s), MCS igual a 15 (64-QAM y codificación=5/6). Al no existir línea de vista va a existir pérdidas por choques, además de las pérdidas de a ruido blanco. Esto se simulará de la siguiente forma:

- 1 choque: pared
- 2 choques: pared y madera.
- 3 choques: pared, madera y vidrio.
- 4 choques: pared, madera, vidrio y metal.

En base a los parámetros establecidos se presentan los siguientes resultados.

```

***DATOS DE LA SIMULACIÓN***
La cantidad de usuarios es 1.
El número de antenas en el transmisor es 2. El número de antenas en el receptor es 2.
El valor de code rate es 5/6. La modulación es 64 QAM. El intervalo de guarda es 3.6 us.
El valor SNR es 46. El ancho de banda es 40.

***RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN***
El valor de Data Rate es: 300.00 Mbps.
Capacidad del Canal: 222.18 Mbps.
Eficiencia del Sistema: 7.50 Mbps/MHz.
Potencia promedio de la señal recibida: -64.7 db

```

Figura 105. Simulación 802.11n con un choque

```

***DATOS DE LA SIMULACIÓN***
La cantidad de usuarios es 1.
El número de antenas en el transmisor es 2. El número de antenas en el receptor es 2.
El valor de code rate es 5/6. La modulación es 64 QAM. El intervalo de guarda es 3.6 us.
El valor SNR es 46. El ancho de banda es 40.

***RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN***
El valor de Data Rate es: 300.00 Mbps.
Capacidad del Canal: 222.18 Mbps.
Eficiencia del Sistema: 7.50 Mbps/MHz.
Potencia promedio de la señal recibida: -66.2 db

```

Figura 106. Simulación 802.11n con dos choques

```

***DATOS DE LA SIMULACIÓN***
La cantidad de usuarios es 1.
El número de antenas en el transmisor es 2. El número de antenas en el receptor es 2.
El valor de code rate es 5/6. La modulación es 64 QAM. El intervalo de guarda es 3.6 us.
El valor SNR es 46. El ancho de banda es 40.

***RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN***
El valor de Data Rate es: 300.00 Mbps.
Capacidad del Canal: 222.18 Mbps.
Eficiencia del Sistema: 7.50 Mbps/MHz.
Potencia promedio de la señal recibida: -69.2 db

```

Figura 107. Simulación 802.11n con tres choques

```

***DATOS DE LA SIMULACIÓN***
La cantidad de usuarios es 1.
El número de antenas en el transmisor es 2. El número de antenas en el receptor es 2.
El valor de code rate es 5/6. La modulación es 64 QAM. El intervalo de guarda es 3.6 us.
El valor SNR es 46. El ancho de banda es 40.

***RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN***
El valor de Data Rate es: 300.00 Mbps.
Capacidad del Canal: 222.18 Mbps.
Eficiencia del Sistema: 7.50 Mbps/MHz.
Potencia promedio de la señal recibida: -105.2 db

```

Figura 108. Simulación 802.11n con cuatro choques

En las figuras se puede observar que el valor del throughput simulados es el mismo que el valor teórico. Dicho parámetro es independiente del número de choques. Las pérdidas por choques aumentan de forma considerable cuando el material es metálico.

5.1.2 Simulación modelo B

Para el modelo B, los datos de simulación son los siguientes: 802.11ac, desvanecimiento Rician (LOS), una STA con 3 antenas, un AP con 3 antenas, ancho de banda de 80 MHz, intervalo de guarda corto (3,6 μ s), MCS igual a 9 (256-QAM y codificación=5/6). En vista que no existen valores reales para todos los ángulos de ambos clusters, se establecen dos casos de análisis:

- Se utiliza en rango en el cual los valores de AoA y AoD son reales de forma simultánea para ambos cluster.
- Se completa los valores de AoA y AoD con un valor muy bajo ($-1e+09$) simulando el valor de menos infinito.

En base a los parámetros establecidos se presentan los siguientes resultados.

```

***DATOS DE LA SIMULACIÓN***
La cantidad de usuarios es 1.
El número de antenas en el transmisor es 3. El número de antenas en el receptor es 3.
El valor MCS es 5/6. La modulación es 256 QAM. El intervalo de guarda es 3.6 us.
El valor SNR es 48. El ancho de banda es 80.

***RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN***
El valor de Data Rate es: 1300.00 Mbps.
Capacidad del Canal: 449.18 Mbps.
Eficiencia del Sistema: 16.25 Mbps/MHz.
Potencia promedio de la señal recibida: -66.8 db

```

Figura 109. Simulación 802.11ac con rango limitado

```

***DATOS DE LA SIMULACIÓN***
La cantidad de usuarios es 1.
El número de antenas en el transmisor es 3. El número de antenas en el receptor es 3.
El valor MCS es 5/6. La modulación es 256 QAM. El intervalo de guarda es 3.6 us.
El valor SNR es 48. El ancho de banda es 80.

***RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN***
El valor de Data Rate es: 1300.00 Mbps.
Capacidad del Canal: 449.18 Mbps.
Eficiencia del Sistema: 16.25 Mbps/MHz.
Potencia promedio de la señal recibida: -68.3 db

```

Figura 110. Simulación 802.11ac con rango completado

Para ambas figuras se observa que los valores de throughput, capacidad del canal y eficiencia del sistema se mantienen. El throughput es el esperado de acuerdo a la teoría. Las pérdidas varían dentro del rango establecido.

5.2 Resultados parte práctica

Para realizar las mediciones de los diferentes parámetros en cada uno de los escenarios se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Se ubicó las STAs a una distancia de uno a dos metros del AP.
- Para los escenarios del 1 al 8: las antenas de la STA1 (laptop) están relativamente a la misma altura que las de AP, mientras que las antenas de la STA2 (desktop) están aproximadamente a 10 cm del suelo, por lo que hay una diferencia de 60 cm de altura aproximadamente, respecto a las antenas del AP.
- Para los escenarios de los mapas de calor: se los realiza en una planta baja, pero esta tiene diferentes niveles, existiendo una diferencia de entre 1 m y 40 cm respecto del nivel donde se encuentra el AP.

5.2.1 Escenarios del 1 al 8

- Escenarios 1 y 2

El estándar utilizado es 802.11n. El tamaño de la ventana TCP es 512 MB. Se realiza durante 5 segundos. Se utiliza el valor máximo de buffer permitido por la aplicación, el cual es 1 MB. Se va a emitir un reporte cada segundo durante 5 segundos.

- Escenarios 3 y 4

El estándar utilizado es 802.11ac. El tamaño de la ventana TCP es 512 MB. Se realiza durante 5 segundos. Se utiliza el valor máximo de buffer permitido por la aplicación, el cual es 1 MB. Se va a emitir un reporte cada segundo durante 5 segundos.

- Escenario 5

Es estándar utilizado es 802.11n. El tamaño de la ventana TCP es 512 MB. Se realiza durante 5 segundos. Se utiliza el valor máximo de buffer permitido por la aplicación, el cual es 1 MB. Se va a emitir un reporte cada segundo durante 5 segundos.

- Escenario 6

El estándar utilizado es 802.11ac. El tamaño de la ventana TCP es 512 MB. Se realiza durante 5 segundos. Se utiliza el valor máximo de buffer permitido por la aplicación, el cual es 1 MB. Se va a emitir un reporte cada segundo durante 5 segundos. El throughput se establece 1 Gbps debido a que la interfaz WAN maneja esa velocidad como máximo.

- Escenario 7

El estándar utilizado es 802.11n. Utiliza UDP. El tamaño de la ventana es 512 MB. El tamaño del bloque es de 1 MB.

- Escenario 8

El estándar utilizado es 802.11ac. Utiliza UDP. El tamaño de la ventana es 512 MB. El tamaño del bloque es de 1 MB.

A continuación se muestran los valores de throughput, jitter y pérdidas, dependiendo el protocolo y el estándar, de cada uno de los escenarios.


```
C:\Windows\system32\cmd.exe

C:\iperf-3.1.3-win64>iperf3 -c 192.168.0.100 -t 5 -w 512M -b 270M -l 1M
Connecting to host 192.168.0.100, port 5201
[ 4] local 192.168.0.101 port 54180 connected to 192.168.0.100 port 5201
[ ID] Interval                Transfer          Bandwidth
[ 4] 0.00-1.00 sec           31.0 MBytes      260 Mbits/sec
[ 4] 1.00-2.00 sec           33.0 MBytes      277 Mbits/sec
[ 4] 2.00-3.00 sec           32.0 MBytes      268 Mbits/sec
[ 4] 3.00-4.00 sec           32.0 MBytes      268 Mbits/sec
[ 4] 4.00-5.00 sec           32.0 MBytes      268 Mbits/sec
-----
[ ID] Interval                Transfer          Bandwidth
[ 4] 0.00-5.00 sec           160 MBytes       268 Mbits/sec
[ 4] 0.00-5.00 sec           2.92 MBytes       4.90 Mbits/sec
sender
receiver

iperf Done.
```

Figura 111. Throughput cliente laptop 802.11n con una línea (escenario 1)

```
C:\Windows\system32\cmd.exe

C:\iperf-3.1.3-win64>iperf3 -c 192.168.0.100 -t 5 -w 512M -b 270M -l 1M -P 10 -i
5
Connecting to host 192.168.0.100, port 5201
[ 4] local 192.168.0.101 port 54408 connected to 192.168.0.100 port 5201
[ 6] local 192.168.0.101 port 54409 connected to 192.168.0.100 port 5201
[ 8] local 192.168.0.101 port 54410 connected to 192.168.0.100 port 5201
[10] local 192.168.0.101 port 54411 connected to 192.168.0.100 port 5201
[12] local 192.168.0.101 port 54412 connected to 192.168.0.100 port 5201
[14] local 192.168.0.101 port 54413 connected to 192.168.0.100 port 5201
[16] local 192.168.0.101 port 54414 connected to 192.168.0.100 port 5201
[18] local 192.168.0.101 port 54415 connected to 192.168.0.100 port 5201
[20] local 192.168.0.101 port 54416 connected to 192.168.0.100 port 5201
[22] local 192.168.0.101 port 54417 connected to 192.168.0.100 port 5201
[ ID] Interval                Transfer          Bandwidth
[ 4] 0.00-5.01 sec           160 MBytes       268 Mbits/sec
[ 6] 0.00-5.01 sec           160 MBytes       268 Mbits/sec
[ 8] 0.00-5.01 sec           160 MBytes       268 Mbits/sec
[10] 0.00-5.01 sec           160 MBytes       268 Mbits/sec
[12] 0.00-5.01 sec           160 MBytes       268 Mbits/sec
[14] 0.00-5.01 sec           160 MBytes       268 Mbits/sec
[16] 0.00-5.01 sec           160 MBytes       268 Mbits/sec
[18] 0.00-5.01 sec           160 MBytes       268 Mbits/sec
[20] 0.00-5.01 sec           160 MBytes       268 Mbits/sec
[22] 0.00-5.01 sec           160 MBytes       268 Mbits/sec
[SUM] 0.00-5.01 sec        1.56 GBytes      2.68 Gbits/sec
-----
[ ID] Interval                Transfer          Bandwidth
[ 4] 0.00-5.01 sec           160 MBytes       268 Mbits/sec
[ 4] 0.00-5.01 sec           699 KBytes       1.14 Mbits/sec
[ 6] 0.00-5.01 sec           160 MBytes       268 Mbits/sec
[ 6] 0.00-5.01 sec           717 KBytes       1.17 Mbits/sec
[ 8] 0.00-5.01 sec           160 MBytes       268 Mbits/sec
[ 8] 0.00-5.01 sec           637 KBytes       1.04 Mbits/sec
[10] 0.00-5.01 sec           160 MBytes       268 Mbits/sec
[10] 0.00-5.01 sec           740 KBytes       1.21 Mbits/sec
[12] 0.00-5.01 sec           160 MBytes       268 Mbits/sec
[12] 0.00-5.01 sec           723 KBytes       1.18 Mbits/sec
[14] 0.00-5.01 sec           160 MBytes       268 Mbits/sec
[14] 0.00-5.01 sec           660 KBytes       1.08 Mbits/sec
[16] 0.00-5.01 sec           160 MBytes       268 Mbits/sec
[16] 0.00-5.01 sec           709 KBytes       1.16 Mbits/sec
[18] 0.00-5.01 sec           160 MBytes       268 Mbits/sec
[18] 0.00-5.01 sec           766 KBytes       1.25 Mbits/sec
[20] 0.00-5.01 sec           160 MBytes       268 Mbits/sec
[20] 0.00-5.01 sec           729 KBytes       1.19 Mbits/sec
[22] 0.00-5.01 sec           160 MBytes       268 Mbits/sec
[22] 0.00-5.01 sec           727 KBytes       1.19 Mbits/sec
[SUM] 0.00-5.01 sec        1.56 GBytes      2.68 Gbits/sec
[SUM] 0.00-5.01 sec        6.94 MBytes      11.6 Mbits/sec
sender
receiver
sender
receiver
sender
receiver
sender
receiver
sender
receiver
sender
receiver
sender
receiver
sender
receiver
sender
receiver
sender
receiver
sender
receiver
sender
receiver
sender
receiver

iperf Done.

C:\iperf-3.1.3-win64>_
```

Figura 112. Throughput cliente laptop 802.11n con diez líneas (escenario 2)

```

C:\Windows\System32\cmd.exe
C:\iperf-3.1.3-win64>iperf3 -c 192.168.0.101 -t 5 -w 512M -b 850M -l 1M
Connecting to host 192.168.0.101, port 5201
[ 4] local 192.168.0.100 port 49177 connected to 192.168.0.101 port 5201
[ ID] Interval           Transfer             Bandwidth
[ 4] 0.00-1.00 sec      93.0 MBytes        780 Mbits/sec
[ 4] 1.00-2.00 sec     102 MBytes        856 Mbits/sec
[ 4] 2.00-3.00 sec     101 MBytes        847 Mbits/sec
[ 4] 3.00-4.00 sec     101 MBytes        847 Mbits/sec
[ 4] 4.00-5.00 sec     102 MBytes        856 Mbits/sec
-----
[ ID] Interval           Transfer             Bandwidth
[ 4] 0.00-5.00 sec     499 MBytes        837 Mbits/sec
[ 4] 0.00-5.00 sec     24.6 MBytes        41.3 Mbits/sec
sender
receiver
iperf Done.

```

Figura 113. Throughput cliente desktop 802.11ac con una línea (escenario 3)

```

C:\Windows\System32\cmd.exe
C:\iperf-3.1.3-win64>iperf3 -c 192.168.0.101 -t 5 -w 512M -b 850M -l 1M -P 10 -i
5
Connecting to host 192.168.0.101, port 5201
[ 4] local 192.168.0.100 port 49207 connected to 192.168.0.101 port 5201
[ 6] local 192.168.0.100 port 49208 connected to 192.168.0.101 port 5201
[ 8] local 192.168.0.100 port 49209 connected to 192.168.0.101 port 5201
[10] local 192.168.0.100 port 49210 connected to 192.168.0.101 port 5201
[12] local 192.168.0.100 port 49211 connected to 192.168.0.101 port 5201
[14] local 192.168.0.100 port 49212 connected to 192.168.0.101 port 5201
[16] local 192.168.0.100 port 49213 connected to 192.168.0.101 port 5201
[18] local 192.168.0.100 port 49214 connected to 192.168.0.101 port 5201
[20] local 192.168.0.100 port 49215 connected to 192.168.0.101 port 5201
[22] local 192.168.0.100 port 49216 connected to 192.168.0.101 port 5201
[ ID] Interval           Transfer             Bandwidth
[ 4] 0.00-5.00 sec      197 MBytes        331 Mbits/sec
[ 6] 0.00-5.00 sec      153 MBytes        257 Mbits/sec
[ 8] 0.00-5.00 sec      151 MBytes        253 Mbits/sec
[10] 0.00-5.00 sec      151 MBytes        253 Mbits/sec
[12] 0.00-5.00 sec      151 MBytes        253 Mbits/sec
[14] 0.00-5.00 sec      151 MBytes        253 Mbits/sec
[16] 0.00-5.00 sec      151 MBytes        253 Mbits/sec
[18] 0.00-5.00 sec      151 MBytes        253 Mbits/sec
[20] 0.00-5.00 sec      150 MBytes        252 Mbits/sec
[22] 0.00-5.00 sec      150 MBytes        252 Mbits/sec
[SUM] 0.00-5.00 sec    1.52 GBytes        2.61 Gbits/sec
-----
[ ID] Interval           Transfer             Bandwidth
[ 4] 0.00-5.00 sec      197 MBytes        331 Mbits/sec
[ 4] 0.00-5.00 sec      10.7 MBytes        17.9 Mbits/sec
[ 6] 0.00-5.00 sec      153 MBytes        257 Mbits/sec
[ 6] 0.00-5.00 sec      6.41 MBytes        10.8 Mbits/sec
[ 8] 0.00-5.00 sec      151 MBytes        253 Mbits/sec
[ 8] 0.00-5.00 sec      6.38 MBytes        10.7 Mbits/sec
[10] 0.00-5.00 sec      151 MBytes        253 Mbits/sec
[10] 0.00-5.00 sec      8.32 MBytes        14.0 Mbits/sec
[12] 0.00-5.00 sec      151 MBytes        253 Mbits/sec
[12] 0.00-5.00 sec      9.48 MBytes        15.9 Mbits/sec
[14] 0.00-5.00 sec      151 MBytes        253 Mbits/sec
[14] 0.00-5.00 sec      6.95 MBytes        11.7 Mbits/sec
[16] 0.00-5.00 sec      151 MBytes        253 Mbits/sec
[16] 0.00-5.00 sec      8.44 MBytes        14.2 Mbits/sec
[18] 0.00-5.00 sec      151 MBytes        253 Mbits/sec
[18] 0.00-5.00 sec      6.53 MBytes        11.0 Mbits/sec
[20] 0.00-5.00 sec      150 MBytes        252 Mbits/sec
[20] 0.00-5.00 sec      6.30 MBytes        10.6 Mbits/sec
[22] 0.00-5.00 sec      150 MBytes        252 Mbits/sec
[22] 0.00-5.00 sec      7.75 MBytes        13.0 Mbits/sec
[SUM] 0.00-5.00 sec    1.52 GBytes        2.61 Gbits/sec
[SUM] 0.00-5.00 sec    77.2 MBytes        130 Mbits/sec
sender
receiver
sender
receiver
sender
receiver
sender
receiver
sender
receiver
sender
receiver
sender
receiver
sender
receiver
sender
receiver
sender
receiver
sender
receiver
sender
receiver
sender
receiver
iperf Done.

```

Figura 114. Throughput cliente desktop 802.11ac con diez líneas (escenario 4)

```

C:\iperf-3.1.3-win64>iperf3 -c iperf.biznetnetworks.com -t 5 -w 512M -b 270M -l 1M
Connecting to host iperf.biznetnetworks.com, port 5201
[ 4] local 192.168.0.101 port 49310 connected to 117.102.109.186 port 5201
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[ 4]  0.00-1.00      sec   30.0 MBytes  252 Mbits/sec
[ 4]  1.00-2.00      sec   33.0 MBytes  277 Mbits/sec
[ 4]  2.00-3.00      sec   32.0 MBytes  268 Mbits/sec
[ 4]  3.00-4.00      sec   32.0 MBytes  268 Mbits/sec
[ 4]  4.00-5.00      sec   32.0 MBytes  268 Mbits/sec
-----
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[ 4]  0.00-5.00      sec    159 MBytes  267 Mbits/sec
[ 4]  0.00-5.00      sec     1.77 MBytes  2.97 Mbits/sec

iperf Done.
C:\iperf-3.1.3-win64>

```

Figura 115. Throughput cliente laptop 802.11n, servidor URL (escenario 5)

```

C:\iperf-3.1.3-win64>iperf3 -c iperf.scottlinux.com -t 5 -w 512M -b 1G -l 1M
Connecting to host iperf.scottlinux.com, port 5201
[ 4] local 192.168.0.100 port 49351 connected to 45.33.39.39 port 5201
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[ 4]  0.00-1.00      sec    110 MBytes  923 Mbits/sec
[ 4]  1.00-2.00      sec    119 MBytes  998 Mbits/sec
[ 4]  2.00-3.00      sec    119 MBytes  998 Mbits/sec
[ 4]  3.00-4.00      sec    119 MBytes  998 Mbits/sec
[ 4]  4.00-5.00      sec    49.0 MBytes  411 Mbits/sec
-----
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[ 4]  0.00-5.00      sec     516 MBytes  866 Mbits/sec
[ 4]  0.00-5.00      sec     4.61 MBytes  7.74 Mbits/sec

iperf Done.

```

Figura 116. Throughput cliente desktop 802.11ac, servidor URL (escenario 6)

```

C:\iperf-3.1.3-win64>iperf3 -c 192.168.0.100 -u -w 512M -b 270M -l 1000
Connecting to host 192.168.0.100, port 5201
[ 4] local 192.168.0.101 port 64316 connected to 192.168.0.100 port 5201
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth     Total Datagrams
[ 4]  0.00-1.00      sec     4.40 MBytes  36.9 Mbits/sec  4613
[ 4]  1.00-2.00      sec     2.97 MBytes  25.0 Mbits/sec  3119
[ 4]  2.00-3.00      sec     4.44 MBytes  37.2 Mbits/sec  4654
[ 4]  3.00-4.00      sec     3.62 MBytes  30.4 Mbits/sec  3798
[ 4]  4.00-5.00      sec     3.66 MBytes  30.7 Mbits/sec  3833
[ 4]  5.00-6.00      sec    10.1 MBytes  84.9 Mbits/sec  10617
[ 4]  6.00-7.00      sec    10.4 MBytes  87.2 Mbits/sec  10903
[ 4]  7.00-8.00      sec    10.3 MBytes  86.5 Mbits/sec  10810
[ 4]  8.00-9.00      sec    10.4 MBytes  87.0 Mbits/sec  10873
[ 4]  9.00-10.00     sec    10.3 MBytes  86.5 Mbits/sec  10819
-----
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth     Jitter      Lost/Total Datag
rams
[ 4]  0.00-10.00     sec     70.6 MBytes  59.2 Mbits/sec  0.139 ms  206/74039 <0.28%
>
[ 4] Sent 74039 datagrams

iperf Done.
C:\iperf-3.1.3-win64>_

```

Figura 117. Jitter y pérdidas cliente laptop 802.11n (escenario 7)

```

C:\iperf-3.1.3-win64>iperf3 -c 192.168.0.101 -u -w 512M -b 850M -l 1000
Connecting to host 192.168.0.100, port 5201
[ 4] local 192.168.0.101 port 65494 connected to 192.168.0.100 port 5201
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth   Total Datagrams
[ 4] 0.00-1.01 sec     95.2 MBytes  788 Mbits/sec 1524
[ 4] 1.01-2.01 sec     106 MBytes  888 Mbits/sec 1691
[ 4] 2.01-3.01 sec     72.3 MBytes  608 Mbits/sec 1158
[ 4] 3.01-4.01 sec     31.6 MBytes  266 Mbits/sec  506
[ 4] 4.01-5.01 sec     42.3 MBytes  355 Mbits/sec  677
[ 4] 5.01-6.01 sec     31.3 MBytes  263 Mbits/sec  501
[ 4] 6.01-7.00 sec     45.9 MBytes  385 Mbits/sec  734
[ 4] 7.00-8.00 sec     25.6 MBytes  215 Mbits/sec  409
[ 4] 8.00-9.00 sec     62.5 MBytes  525 Mbits/sec 1001
[ 4] 9.00-10.02 sec    41.1 MBytes  340 Mbits/sec  658
-----
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth   Jitter      Lost/Total Datag
rams
[ 4] 0.00-10.02 sec    553 MBytes  464 Mbits/sec 6.250 ns    7/8858 (0.079%)
[ 4] Sent 8858 datagrams
iperf Done.

```

Figura 118. Jitter y pérdidas cliente desktop 802.11ac (escenario 8)

Tabla 19

Comparación entre los valores simulados y los prácticos

Escenario	Simulado (Mbps)	Práctico (Mbps)	Pérdida (%)
1	300	268	10,67
2	300	268	10,67
3	1300	837	35,61
4	1300	330	74,62
5	300	267	11,00
6	1300	866	33,38

Se puede observar que las diferencias entre los valores simulados y los prácticos son de entre el 10% y el 35%, lo cual es aceptable en las comunicaciones inalámbricas. En el escenario 4 se tiene una pérdida del 74%, la cual es producida debido al número de conexiones simultáneas que establece STA2 con STA1. Otra de las razones para tener esta pérdida es que no tienen el mismo número de antenas STA1 y STA2, lo cual limita el throughput entre las STAs. En los escenarios 7 y 8 se observa que los valores de jitter y de pérdidas son muy pequeños, lo cual es debido a que el

protocolo con el que trabajan estos escenarios es UDP, el cual no está orientado a la conexión. Además que la cantidad de obstáculos entre las STAs y el AP son muy pocos o no existen.

5.2.2 Mapas de calor

Para realizar esta sección se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Se realizaron 2 mapas de calor por cada STA.
- Se utilizó la interfaz específica del AP dependiendo el estándar. La otra interfaz se la apagó.

Los gráficos obtenidos son los que se muestran a continuación.

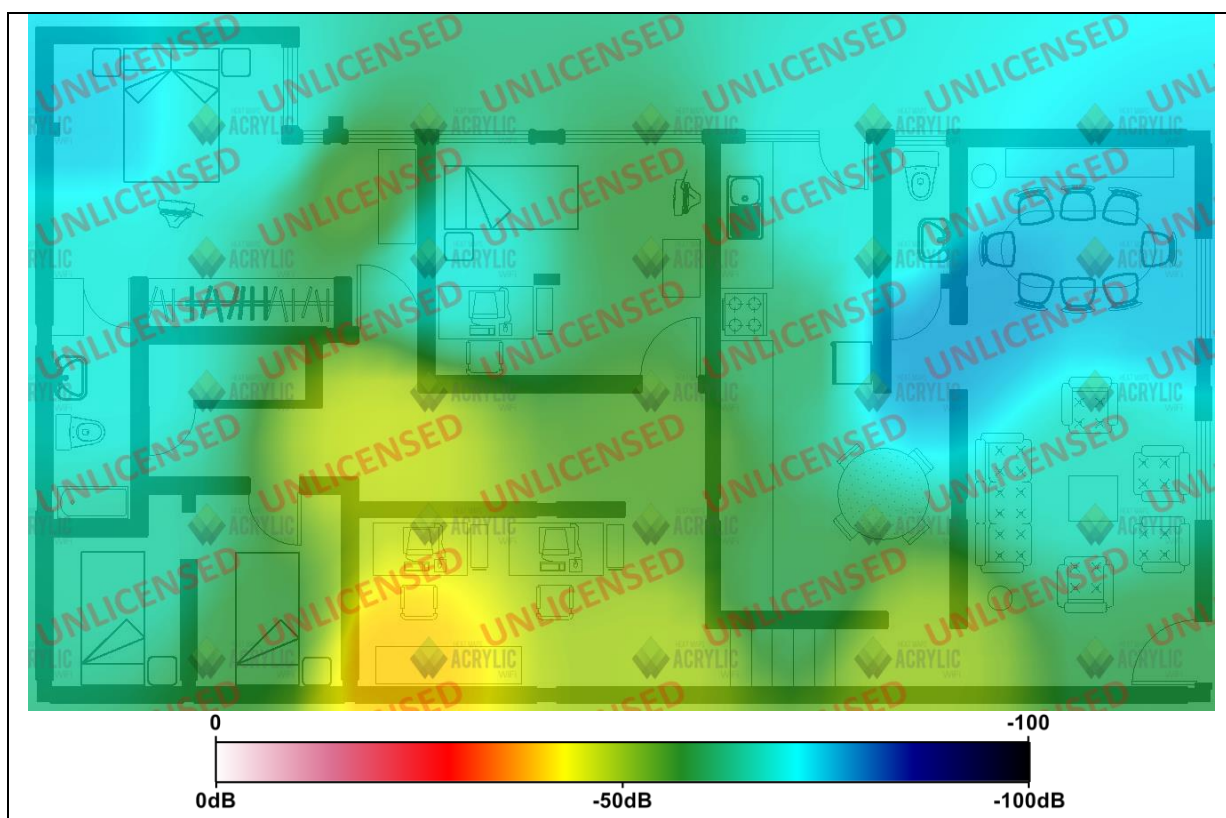


Figura 119. Mapa de calor laptop 802.11n

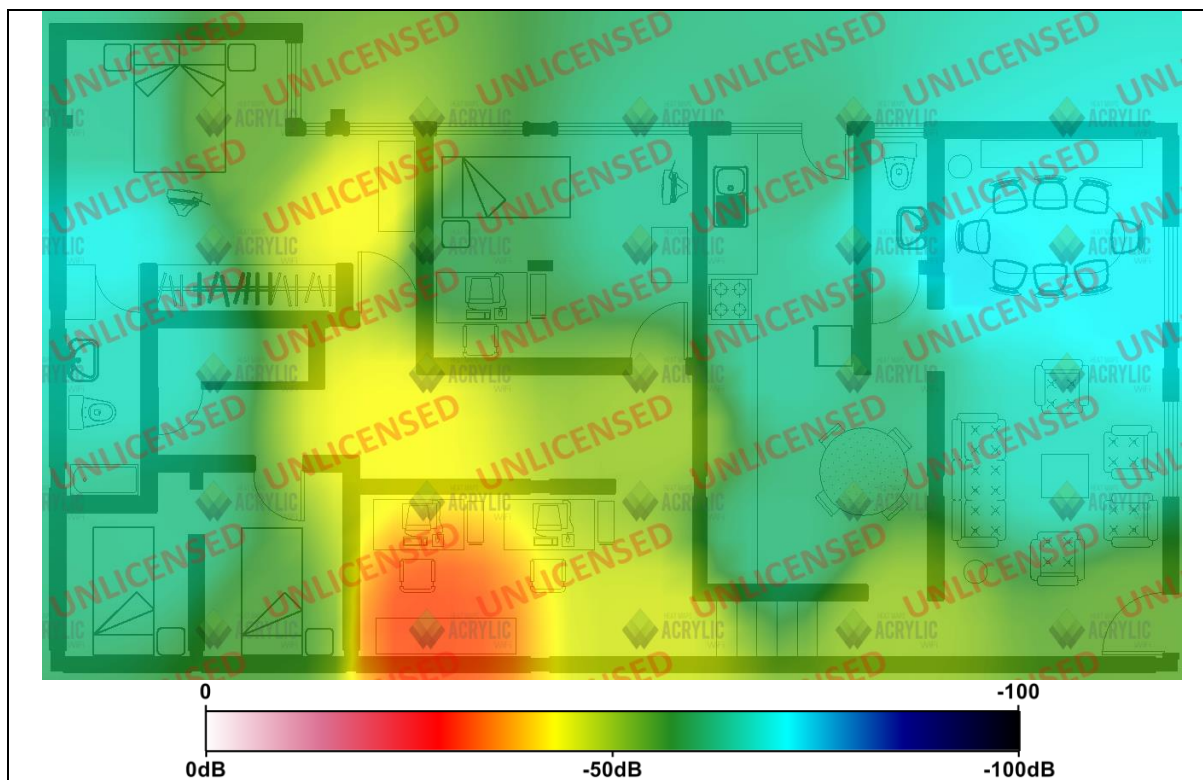


Figura 120. Mapa de calor desktop 802.11n

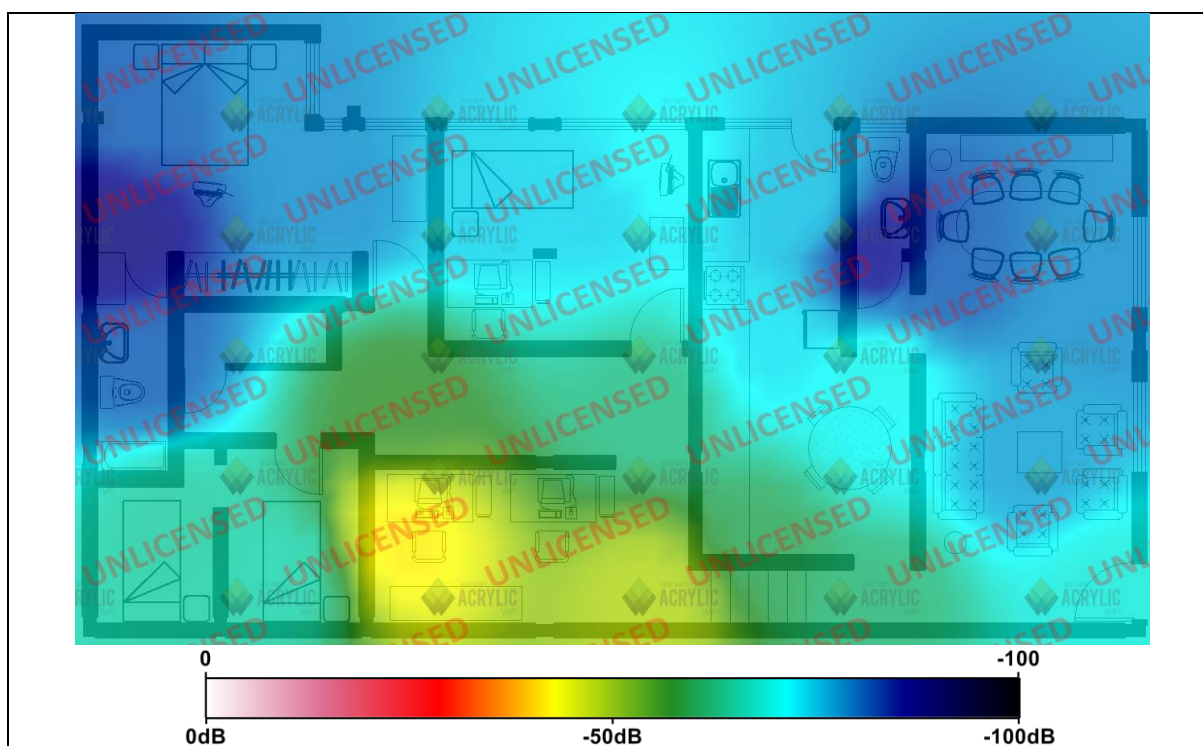


Figura 121. Mapa de calor laptop 802.11ac

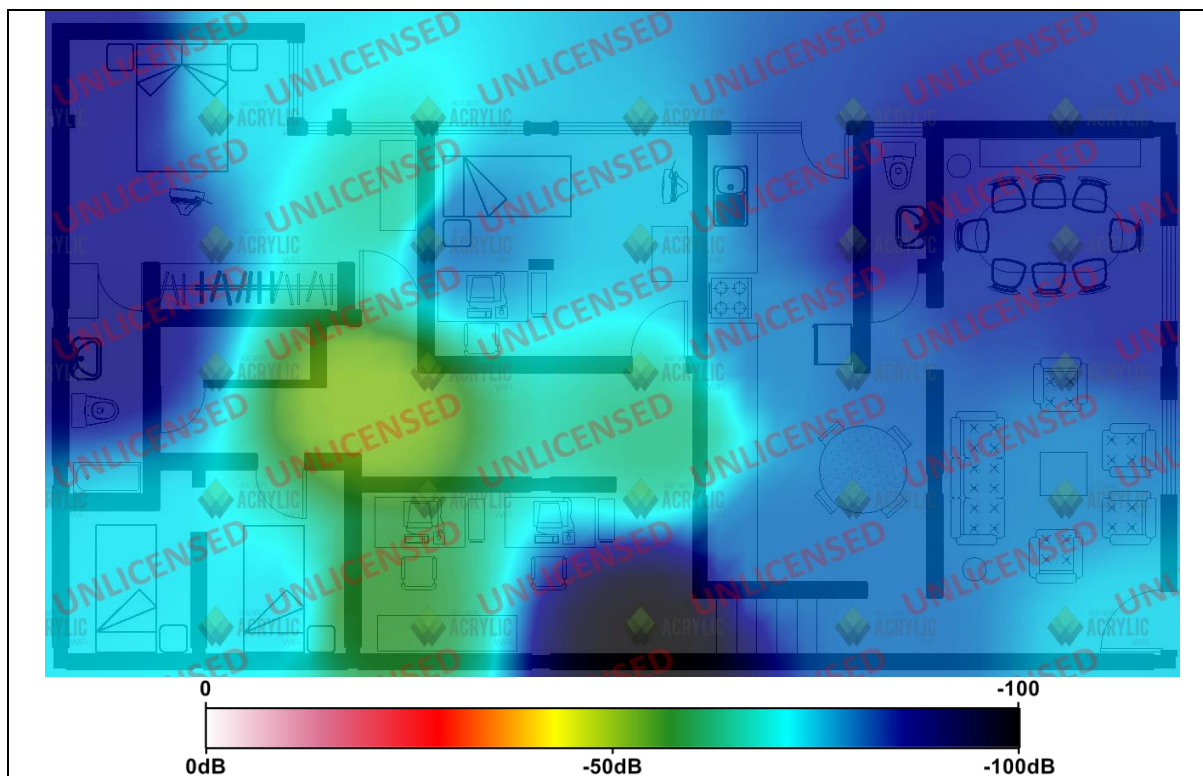


Figura 122. Mapa de calor desktop 802.11ac

Acrylic HeatMaps permite obtener el valor medio de potencia de cada uno de los mapas de calor, obteniendo los siguientes datos: laptop 802.11n: -62 db; desktop 802.11n: -58 db; laptop 802.11ac: -70 db; desktop 802.11ac: -76 db. Como se puede observar las pérdidas entre un estándar y otro varían, siendo 802.11ac la que presenta mayores pérdidas, esto debido a que en 5 GHz las pérdidas por choques son mayores. De igual forma, si se compara con los valores simulados se observa que son muy cercanos a los valores prácticos.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- El presente trabajo detalla los avances del estándar 802.11ac comparado con el estándar 802.11n, tal como mayor ancho de banda, mayor número de cadenas espaciales, mayor orden de modulación, MU-MIMO y mejor SNR, los cuales permiten un mayor throughput, permitiendo mejorar las comunicaciones de los dispositivos en el hogar o trabajo.
- La simulación realizada para ambos estándares muestran condiciones reales para 802.11n y condiciones casi ideales para 802.11ac, obteniendo en ambos casos resultados que permitan ser comparados con escenarios reales, y permitan utilizar dichas simulaciones como base para otros trabajos.
- Respecto a la cobertura de la señal, se observa que para el estándar 802.11n es muy similar utilizando 2 o 3 antenas; por el contrario, para el estándar 802.11ac existe mayor diferencia a medida que aumenta la distancia con el AP y el número de antenas que maneja la STA.
- Los retos para 802.11ac son muy grandes. Utiliza una mayor velocidad, es excelente para transmisiones de voz e imagen, existe poca interferencia con otras señales en la frecuencia en la que trabaja, y puede trabajar en la misma banda con 802.11n. Pero a medida que aumenta la distancia entre dispositivos la señal se va atenuando, además que necesita un mayor consumo de energía. El dispositivo final debe tener características a nivel de

hardware muy buenas para aprovechar todos los beneficios que ofrece el estándar, e integrarse de forma satisfactoria con el Internet de las Cosas.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda utilizar este trabajo como base con miras a continuar con el estudio de 802.11ac, una vez que se presenten mejoras en el estándar, y también para la comparación con otros estándares de la IEEE que aparezcan en el futuro.
- Se recomienda utilizar la versión actual de Matlab, esto debido a que se podrían implementar ciertas partes del código con funciones que las simplifiquen, e incluso utilizar bloques, los cuales permitan una mayor facilidad para la programación.
- A medida que los costos bajen y sea mayor la implementación de 802.11ac, se deberían realizar nuevamente pruebas prácticas del estándar. Esto debido a que el mismo debería de traer mejores características (Wave2 y Wave3) y una mejor integración con los dispositivos finales.
- En el caso de implementar hardware 802.11ac en dispositivos que tengan algunos años de antigüedad, se recomienda realizar algunas pruebas una vez instalado, ya que dependiendo del equipo y el sistema operativo pueden variar los drivers que sean compatibles con la interfaz instalada.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, D. (2015). Comunicaciones Inalámbricas. *Presentación de Power Point*. Quito, Pichincha, Ecuador.

Álvarez Calvo, I. (08 de Abril de 2013). Pérdidas de inserción en diferentes tipos de materiales y árboles. Madrid, Comunidad de Madrid, España.

Anguís Horno, J. J. (Marzo de 2008). Redes de Área Local Inalámbricas: Diseño de la WLAN de Wheelers Lane Technology College. Sevilla, Andalucía, España.

CableFree. (2016). *802.11ac Technology*. Obtenido de <http://www.cablefree.net/wirelesstechnology/802-11ac/>

Cisco. (28 de 01 de 2016). *Cisco Community*. Obtenido de MCS display on Cisco WLC Prime: <https://community.cisco.com/kxiwq67737/attachments/kxiwq67737/5956-discussions-getting-started-wireles/81189/1/revolution-wi-fi-mcs-to-snr-single-page.pdf>

Cisco. (2018). 802.11ac: The fifth Generation of Wi-Fi. *Technical White Paper*, 20.

Cisco. (20 de Junio de 2018). *Cisco*. Obtenido de 802.11 ac Wave 2 FAQ: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/enterprise-networks/802-11ac-solution/q-and-a-c67-734152.html>

Dowhuszko, A. A. (12 de Marzo de 2010). Teoría de la Transmisión de Información sobre Canales MIMO Inalámbricos con Múltiples Usuarios. Córdoba, Córdoba, Argentina.

ETHW. (10 de Septiembre de 2015). *Acerca de ETHW*. Obtenido de Engineering and Technology History Wiki: https://ethw.org/Wireless_LAN_802.11_Wi-Fi

Gast, M. (2012). *802.11n: A Survival Guide*. Sebastopol: O'Reilly.

Gast, M. (2013). *802.11ac: A Survival Guide*. Sebastopol: O'Reilly.

Grigorik, I. (2013). *High Performance Browser Networking*. O'Reilly.

IEEE. (Mayo de 2004). TGN Channel Models.

IEEE. (Marzo de 2010). TGac Channel Model Addendum.

IEEE. (Julio de 01 de 2014). *News & Events: Press Releases*. Recuperado el 13 de 10 de 2015, de http://standards.ieee.org/news/2014/ieee_802_11ac_ballot.html

IEEE. (21 de Septiembre de 2015). *Official IEEE 802.11 working group project timelines*. Recuperado el 13 de 10 de 2015, de http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/802.11_Timelines.htm

IEEE 802.11 Working Group. (2012). *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. New York.

iPerf. (s.f.). *iPerf - The ultimate speed test tool for TCP, UDP and SCTP*. Obtenido de <https://iperf.fr/>

Lew, M. (Febrero de 2012). LAN inalámbrica 802.11ac. Novedades y su repercusión en el diseño y las pruebas.

LLangari Arizo, F. A., & Mejía Quishpe, E. J. (Marzo de 2016). Estudio, pruebas y simulación del estándar IEEE 802.11ac basándose en MU-MIMO (MIMO MULTIUSER). Quito, Pichincha, Ecuador.

MathWorks. (2006). *MathWorks Latinoamérica*. Obtenido de qammod: <https://la.mathworks.com/help/comm/ref/qammod.html>

MathWorks. (2008). *MathWorks Latinoamérica*. Obtenido de randi: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/randi.html>

MathWorks. (2009). *MathWorks Latinoamérica*. Obtenido de IEEE 802.11n WLAN File Update:

<https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26232-ieee-802-11n-wlan-file-update>

MathWorks. (2012). *MathWorks Latinoamérica*. Obtenido de comm.MIMOChannel System

object: <https://la.mathworks.com/help/comm/ref/comm.mimochannel-system-object.html>

MathWorks. (2014). *MathWorks Latinoamérica*. Obtenido de comm.OFDMModulator System

object: <https://la.mathworks.com/help/comm/ref/comm.ofdmmodulator-system-object.html>

MathWorks. (2018). *MathWorks Latinoamérica*. Obtenido de Fading channels:

<https://la.mathworks.com/help/comm/ug/fading-channels.html>

Navarrete Chávez, C. (14 de Octubre de 2009). Evaluación de la tecnología IEEE 802.11n con la plataforma OPNET. Barcelona, Cataluña, España.

Netgear. (28 de Noviembre de 2016). *Netgear Support*. Obtenido de ¿Qué es la calidad del servicio

multimedia Wi-Fi y cómo puedo activarla en mi router Nighthawk R7000?:

<https://kb.netgear.com/es/24669/Qu%C3%A9-es-la-calidad-del-servicio-multimedia-Wi-Fi-y-c%C3%B3mo-puedo-activarla-en-mi-router-Nighthawk-R7000-1479991122780>

Networks, F. (2014). *Everything you need to know about 802.11ac*. Recuperado el 12 de 10 de 2015, de <http://www.flukenetworks.com/content/80211ac>

Networks, F. (2014). *White Paper: The impact of 802.11ac wireless networks on Network Technicians*. Recuperado el 12 de 10 de 2015, de

<http://www.flukenetworks.com/content/white-paper-impact-80211ac-wireless-networks-network-technicians>

- Paul, T., & Ogunfunmi, T. (2008). *IEEE Circuits and Systems Magazine*. Obtenido de Wireless LAN Comes of Age: Understanding the IEEE 802.11n Amendment: <http://www.iith.ac.in/~tbr/teaching/docs/802.11n-MagazinePaper.pdf>
- Stallings, W. (2004). *Comunicaciones y redes de computadores*. Monterrey: PEARSON EDUCACIÓN.
- Tanenbaum, A. S. (2003). *Redes de computadoras*. Amsterdam: PEARSON Educación.
- Tena Carbonell, X. (04 de Diciembre de 2013). Cómo conocer el uso actual de las redes WLAN basadas en IEEE 802.11. Barcelona, Cataluña, España.
- TP-LINK. (2014). *Preguntas más frecuentes sobre la tecnología 802.11n*. Recuperado el 12 de 10 de 2015, de <http://www.tp-link.ec/article/?faqid=229>
- TP-LINK. (2016). *Adaptadores*. Obtenido de Archer T9E: https://www.tp-link.com/es/products/details/cat-11_Archer-T9E.html#specifications
- TP-LINK. (2016). *Routers Inalámbricos*. Obtenido de Archer C7: https://www.tp-link.com/es/products/details/cat-9_Archer-C7.html#overview
- Valencia, U. P. (02 de Diciembre de 2010). *Blog Historia de la Informática*. Recuperado el 12 de 10 de 2015, de <http://histinf.blogs.upv.es/2010/12/02/historia-de-las-redes-inalambricas/>