

# RED WIFI 802.11AC PARA ENVÍO DE DATOS TREN- TIERRA EN EL SECTOR FERROVIARIO



**ALBERTO SABROSO  
BARCELÓ**

**GRADO EN INGENIERÍA DE  
TECNOLOGÍAS Y  
SERVICIOS DE  
TELECOMUNICACIÓN**  
Redes Inalámbricas

**Tutor/a de TFG**

FERRAN ADELANTADO I  
FREIXER

**Profesor/a responsable de  
la asignatura**

FERRAN ADELANTADO I  
FREIXER

24/01/2024

Universitat Oberta  
de Catalunya



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-  
NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

# AGRADECIMIENTOS

## **Para Alberto Jesús y Ana María**

Me gustaría dedicar este TFG a toda la gente que ha estado a mi lado, apoyándome, durante estos años de carrera.

No ha sido fácil pero aquí está.

No me gustaría olvidarme de dos personas que, aunque ya no estén en este plano, sé que están muy orgullosos de mí.

Por último, darme las gracias a mí porque (a pesar de todo este último año) no has tirado la toalla, nunca.

Lo hicimos.



## Ficha del Trabajo Final

<b>Título del trabajo:</b>	RED WIFI 802.11AC PARA ENVÍO DE DATOS TREN-TIERRA EN EL SECTOR FERROVIARIO
<b>Nombre del autor/a:</b>	ALBERTO SABROSO BARCELÓ
<b>Nombre del Tutor/a de TF:</b>	FERRAN ADELANTADO I FREIXER
<b>Nombre del/de la PRA:</b>	FERRAN ADELANTADO I FREIXER
<b>Fecha de entrega:</b>	01/2024
<b>Titulación o programa:</b>	GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS Y SERVICIOS DE TELECOMUNICACIÓN
<b>Área del Trabajo Final:</b>	Redes inalámbricas
<b>Idioma del trabajo:</b>	Castellano
<b>Palabras clave</b>	WIFI ( <i>Wireless Fidelity</i> ), MIMO ( <i>Multiple-input Multiple-output</i> ), WLC ( <i>Wireless Lan Controller</i> )

### Resumen del Trabajo

El propósito de este proyecto es el diseño de una red WiFi para la comunicación tren-tierra en una línea ferroviaria de nueva construcción en México (Tren Maya). Este sistema se encargará de la descarga de grabaciones del sistema CCTV del tren, que se almacenarán en un servidor en tierra para una mayor disponibilidad de las mismas. El objetivo principal es definir la tasa de transferencia máxima que se puede obtener con la arquitectura y tecnología propuestas.

Para llegar a ello, se hará un estudio del estándar 802.11ac que, junto con OFDM y MU-MIMO, aportará los datos necesarios para la definición de los distintos elementos que formarán parte de la arquitectura del sistema.

La metodología seguida en este proyecto es presentar un estudio teórico, una simulación informática del entorno en el que se operará y unas pruebas de equipo en el laboratorio para dos escenarios posibles: un depósito de trenes (estático) y un trayecto de un kilómetro de vía (dinámico).

Además, y gracias a que se dispone de un laboratorio funcional con los equipos propuestos para este sistema WiFi, se realizarán una serie de

pruebas para caracterizar los equipos utilizados y verificar que se ajustan a las especificaciones técnicas definidas por el fabricante. Con todo lo anterior, se consigue un sistema WiFi5 funcional con una tasa de transferencia de más de 100Mbps para la descarga de grabaciones.

Por último, cabe remarcar que con la técnica *softroaming*, que incorporan los equipos WiFi, se consigue que el cliente escanee el entorno en movimiento y realice un cambio de punto de acceso sin pérdida de conectividad.

### **Abstract**

The purpose of this project is the design of a Wi-Fi network for train-ground communication on a newly built railway line in Mexico ('Tren Maya'). This system will be responsible for downloading recordings from the train's CCTV system. These recordings will be stored on a server on the ground for greater availability. The main objective is to define the maximum transfer rate which can be obtained with the proposed architecture and technology.

To achieve this, a study of the 802.11ac standard will be carried out. This study, together with OFDM and MU-MIMO, will provide the necessary data for the definition of the different elements that will be part of the architecture of the system.

The methodology followed in this project consists of a theoretical study, a computer simulation of the operational environment and several tests in the laboratory considering two possible scenarios: a train depot (static) and a one-kilometre long route (dynamic).

In addition, thanks to the fact that there is a functional laboratory with the proposed Wi-Fi equipment, a series of tests will be carried out in order to typify the selected equipment and to verify the technical specification provided by the manufacturer. With these steps, a functional Wi-Fi5 system will be deployed with more than 100Mbps data rate for downloading onboard recordings.

Finally, it should be noted that the soft roaming technique, incorporated in the Wi-Fi equipment, allows the client to scan the environment in motion and change the access point without losing connectivity.

# Índice

1.	Introducción	13
1.1.	Contexto y justificación del Trabajo	13
1.2.	Objetivos del Trabajo	14
1.3.	Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad	14
1.4.	Enfoque y método seguido	14
1.5.	Planificación del trabajo	15
1.6.	Breve resumen de productos obtenidos	17
1.7.	Breve descripción de otros capítulos de la memoria	17
2.	Materiales y métodos	19
2.1.	Introducción del proyecto	19
2.2.	Estado del arte	21
2.3.	Redes inalámbricas	28
2.3.1.	IEEE 802.11	28
2.3.2.	Técnica MIMO	31
2.3.3.	Modulación OFDM	35
2.3.3.1.	Relación OFDM y MU-MIMO	39
2.3.4.	Estándar 802.11ac	40
2.3.4.1.	Capa física	44
2.3.4.2.	Subcapa MAC	45
2.3.4.3.	Banda de frecuencias en 802.11ac	47
2.4.	Tecnología WLC	49
2.4.1.	WLC de Hirschmann	52
2.5.	Plataforma virtual	54
2.6.	Servidor NMS	56
2.7.	Composición del Proyecto	59
2.7.1.	Requisitos y condiciones preliminares	59
2.7.2.	Criterios de diseño	59
2.7.3.	Arquitectura lógica del sistema	60
2.7.4.	Plan de frecuencias	61
2.7.5.	Arquitectura del sistema	65

2.7.5.1.	Arquitectura física en vía	65
2.7.5.2.	Arquitectura física en tren (embarcada)	67
2.7.6.	Elementos hardware	68
2.7.6.1.	Elementos Centro de Control	68
2.7.6.1.1.	Servidor central de plataforma virtual	68
2.7.6.1.2.	Servidor para almacenar grabaciones de los trenes	69
2.7.6.1.3.	Switch de comunicaciones	69
2.7.6.1.4.	Armario tipo rack	70
2.7.6.2.	Elementos Vía	71
2.7.6.2.1.	Caja de vía	71
2.7.6.2.2.	Punto de acceso WiFi	71
2.7.6.2.3.	Fuente de alimentación 24V DC	73
2.7.6.2.4.	Convertor de medios	74
2.7.6.2.5.	Descargador/Surge arrestor	74
2.7.6.2.6.	Antenas de vía	75
2.7.6.2.7.	Cable coaxial (RF <i>feeder</i> )	77
2.7.6.2.8.	Cable coaxial (RF jumper)	77
2.7.6.3.	Elementos embarcados (tren)	78
2.7.6.3.1.	Radio Módem (cliente)	78
2.7.6.3.2.	Antenas embarcadas	79
2.7.6.3.3.	Cable coaxial (RF <i>feeder</i> )	80
2.7.6.3.1.	Cable coaxial (RF <i>jumper</i> )	80
2.7.7.	Elementos software	81
2.7.8.	Estudio económico	83
2.8.	Cálculos teóricos previos	85
2.9.	Pruebas simuladas por software	92
2.9.1.	Descripción de simulación de cobertura en Talleres y Cocheras	93
2.9.1.	Descripción de simulación de cobertura en vía	96
2.10.	Pruebas en laboratorio	97
2.10.1.	Descripción de plataforma de pruebas	97
2.10.2.	Descripción de pruebas de <i>throughput</i> en estático	102
2.10.2.1.	Configuración de los equipos de prueba	103
2.10.2.2.	Configuración de la herramienta de medida de <i>throughput</i>	103

2.10.2.3.	Procedimiento de pruebas	105
2.10.3.	Descripción de pruebas de <i>throughput</i> en dinámico ( <i>roaming</i> )	107
2.10.3.1.	Cambios en las configuraciones de los equipos de prueba	107
2.10.3.2.	Cambios en la configuración de la herramienta de medida de <i>throughput</i>	109
2.10.3.3.	Procedimiento de pruebas	109
2.10.4.	Descripción de la prueba final para descarga de grabaciones tren-tierra	117
3.	Resultados	119
3.1.	Pruebas simuladas por software	119
3.1.1.	Estudio de cobertura Talleres y Depósitos	119
3.1.1.1.	Nivel de señal	120
3.1.1.2.	Interferencias	121
3.1.1.3.	Data Rate	122
3.1.2.	Estudio de cobertura en Vía	123
3.1.2.1.	Nivel de señal	124
3.1.2.2.	Interferencias	125
3.1.2.3.	Data Rate	127
3.2.	Pruebas en laboratorio	128
3.2.1.	Resultado sobre pruebas de <i>throughput</i> en estático	128
3.2.1.1.	Conclusiones de las pruebas estáticas	131
3.2.2.	Resultado sobre pruebas de <i>throughput</i> en dinámico ( <i>roaming</i> )	132
3.2.2.1.	Conclusiones de las pruebas dinámicas	136
3.2.2.2.	Prueba extra tras resultados anteriores	138
3.2.3.	Resultado de la prueba final de descarga de grabaciones tren-tierra	140
3.2.3.1.	Conclusión de la prueba final	140
4.	Conclusiones y trabajos futuros	141
5.	Glosario	143
6.	Bibliografía	146
6.1.	Bibliografía para figuras y tablas	151
7.	Anexos	154
7.1.	Datasheets	154
7.1.1.	Punto de acceso WiFi	154
7.1.2.	Antena de Vía	154

7.1.3.	Antena Embarcada	154
7.1.4.	Atenuador variable	154
7.1.5.	Fuente de alimentación 24V DC	155
7.1.6.	Convertor de medios SPIDER PL 40	155
7.1.7.	Descargador/ <i>Surge arrestor</i>	155
7.1.8.	BAT-Controller virtual	155
7.1.9.	Caja de vía	155
7.1.10.	Software Wireless LAN	156
7.1.11.	Armario tipo RACK	156
7.1.12.	Security Center	156
7.1.13.	Huawei Atlas 800 (modelo 3000)	156
7.1.14.	Streamvault de Genetec	156
7.1.15.	Huawei switch S5731-S24P4X	157
7.2.	Manuales de usuario/referencia	157
7.2.1.	Punto de acceso/cliente	157
7.3.	Configuración de los equipos para pruebas estáticas	158
7.3.1.1.	Configuración de Punto de Acceso	158
7.3.1.2.	Configuración de Cliente	168
7.4.	Configuración de los equipos para pruebas dinámicas	172
7.4.1.1.	Cambios en configuración de los puntos de acceso	172
7.4.1.2.	Cambios en configuración del cliente	175
7.5.	Resultado detallados de pruebas de <i>throughput</i> en estático	180
7.5.1.1.	Equipos configurados con canales de 20 MHz	180
7.5.1.2.	Equipos configurados con canales de 40 MHz	185
7.5.1.3.	Equipos configurados con canales de 80 MHz	190
7.6.	Resultados detallados sobre pruebas de <i>throughput</i> en dinámico	195
7.6.1.1.	Test 1 – Roaming a 45% y Force a 12%	195
7.6.1.2.	Test 2 – Roaming a 50% y Force a 12%	197
7.6.1.3.	Test 3 – Roaming a 50% y Force a 41%	199
7.6.1.4.	Test 4 – Roaming a 55% y Force a 45%	201
7.6.1.5.	Test 5 – Roaming a 60% y Force a 51%	203
7.6.1.6.	Test 6 – Roaming a 70% y Force a 61%	205

7.6.1.7.	Test 7 – Roaming a 78% y Force a 61%	207
7.6.1.8.	Test 8 – Roaming a 62% y Force a 42%	209
7.6.1.9.	Test 9 – Valores test 8 en escenario 2	211
7.7.	Fuentes utilizadas para el estudio económico	213

# Lista de Figuras

Figura 1 – Diagrama Gantt – Fase PEC1 .....	16
Figura 2 – Diagrama Gantt – Fase PEC2 .....	16
Figura 3 – Diagrama Gantt – Fase PEC3 .....	16
Figura 4 – Diagrama Gantt – Fase PEC4 .....	16
Figura 5 – Diagrama Tren Maya [49].....	19
Figura 6 – Depósito cercano a la estación de Cancún .....	20
Figura 7 – Recta de entrada a estación de Cancún .....	20
Figura 8 – TEBATREN Metro de Madrid [50] .....	22
Figura 9 – Ekahau Sidekick.....	24
Figura 10 – Ejemplo de interfaz gráfica del software Ekahau [51] .....	24
Figura 11 – Ejemplo de interfaz gráfica de XIRIO ONLINE .....	25
Figura 12 – Ejemplo de cobertura radio en XIRIO ONLINE [52].....	25
Figura 13 – WLC hardware [9] .....	26
Figura 14 – Genetec Security Center [11] .....	27
Figura 15 – Servidor DELL EMC para ESXi [12] .....	27
Figura 16 – Servidor Huawei Fusion para ESXi [13].....	27
Figura 17 – Modulación DSS (Direct Sequence Spread Spectrum) [53].....	30
Figura 18 – Modulación CCK (Complementary Code Keying) [54].....	30
Figura 19 – 16-QAM vs 64-QAM de manera ideal [55].....	32
Figura 20 – 16QAM vs 64 QAM de manera no ideal [55] .....	32
Figura 21 – SISO vs SIMO vs MISO vs MIMO .....	33
Figura 22 – Ejemplo de subcanales MIMO.....	34
Figura 23 – Propagación por trayecto múltiple [56] .....	36
Figura 24 – Representación tiempo-frecuencia de una señal OFDM [57].....	36
Figura 25 – Pulso rectangular en el tiempo [58] .....	37
Figura 26 – Transformada de Fourier de un pulso (sinc) [58].....	37
Figura 27 – OFDM - Prefijo cíclico .....	38
Figura 28 – OFDM - Prefijo cíclico en 3 símbolos [59].....	38
Figura 29 – OFDM – Emisor - Canal – Receptor.....	39
Figura 30 – OFDM+MIMO esquema típico [61].....	40
Figura 31 – 64-QAM vs 256-QAM [62].....	41
Figura 32 – Tipos de subportadoras (OFDM) [64].....	42
Figura 33 – Trama VHT en 802.11ac [66] .....	44
Figura 34 – 802.11 ac frecuencias [67] .....	47
Figura 35 – DFS en 5GHz [68].....	48
Figura 36 – WLC – LWAPP [69].....	49
Figura 37 – WLC – CAPWAP [70].....	50
Figura 38 – WLC – RADIOUS [71].....	51
Figura 39 – BAT-Controller Virtual (versión).....	52
Figura 40 – Parámetros de configuración WLC – Physical WLAN.....	52



Figura 41 – Parámetros de configuración WLC – SSIDs.....	53
Figura 42 – Parámetros de configuración WLC – Actualizaciones .....	53
Figura 43 – Plataforma virtual ESXi [72].....	54
Figura 44 – Virtualización VMWare Vsphere [73].....	55
Figura 45 – Interfaz gráfica NMS [74].....	56
Figura 46 – Interfaz gráfica analizador de trafico de red [74].....	56
Figura 47 – Interfaz gráfica HiVision (topología).....	57
Figura 48 – Interfaz gráfica HiVision (interfaces).....	57
Figura 49 – Interfaz gráfica HiVision (estado del AP) .....	58
Figura 50 – Interfaz gráfica HiVision (listado de operaciones).....	58
Figura 51 – Arquitectura lógica del proyecto .....	60
Figura 52 – Histórico de versiones sobre la atribución de licencias del CNAF .....	61
Figura 53 – MX159 – Bandas de espectro libre definidas por CNAF .....	62
Figura 54 – MX227 – Bandas de espectro libre 5GHz definidas por CNAF .....	62
Figura 55 – MX229 – Bandas de espectro libre 5GHz por CNAF (parte 2).....	62
Figura 56 – Inventario de bandas de frecuencias de espectro libre por IFETEL.....	62
Figura 57 – Canales WiFi de 40MHz seleccionados [75] .....	64
Figura 58 – Arquitectura física – vía.....	65
Figura 59 – Arquitectura física – tren (embarcada) .....	67
Figura 60 – Host plataforma virtual – Atlas 800.....	68
Figura 61 – Streamvault de Genetec.....	69
Figura 62 – Switch S53731 de Huawei .....	69
Figura 63 – Armario tipo rack.....	70
Figura 64 – Caja de vía.....	71
Figura 65 – Punto de Acceso BAT450-F .....	72
Figura 66 – Detalle de puerto de consola, eth2, eth1 y alimentación.....	73
Figura 67 – Detalle de los puertos RF (ant1, ant2 y ant3) .....	73
Figura 68 – Fuente de alimentación PULSE 24V DC .....	73
Figura 69 – Conversor de medios – SPIDER PL 40.....	74
Figura 70 – Descargador/Surge Arrestor.....	74
Figura 71 – Antena de vía.....	75
Figura 72 – Plano de radiación antena (H y V a 5725MHz).....	76
Figura 73 – Soporte orientable para antena (Ref. 9091.99.0183).....	76
Figura 74 – Cable coaxial RF Feeder SPUMA-400 .....	77
Figura 75 – Cable coaxial RF Jumper RADOX_RF_400 .....	78
Figura 76 – Antena embarcada SENCITY RAIL EXCEL .....	79
Figura 77 – Antena embarcada SENCITY RAIL EXCEL diagrama de radiación V y H.....	80
Figura 78 – Dibujo orientativo de la posición de las antenas embarcadas.....	80
Figura 79 – HiDiscovery ventana principal .....	81
Figura 80 – LANConfig ventana principal .....	81
Figura 81 – LANMonitor ventana principal .....	82
Figura 82 – Security Center 5.11 - Genetec.....	82
Figura 83 – Esquema con elementos que componen el balance de potencias .....	85

Figura 84 – Fórmula de Friis [43] .....	86
Figura 85 – Fórmula de balance de potencias [43].....	86
Figura 86 – Esquema con elementos que componen el balance de potencias .....	92
Figura 87 – Cobertura WiFi en Talleres y Cocheras (depósito de trenes) .....	93
Figura 88 – Selección de ubicación para los puntos de acceso .....	93
Figura 89 – Modelo de AP Hirschmann (5GHz y MIMO) a utilizar en la simulación.....	94
Figura 90 – Configuraciones varias sobre la instalación.....	94
Figura 91 – Configuraciones varias sobre la tecnología a utilizar .....	95
Figura 92 – Listado de datos que proporciona la simulación .....	95
Figura 93 – Plano para cobertura WiFi a lo largo de 1 kilómetro de vía .....	96
Figura 94 – Plataforma de pruebas [Configuración 1] .....	97
Figura 95 – Equipo BAT450-F.....	98
Figura 96 – Antena (MIMO 3x3) conectada con 3 cables RF al AP y al cliente .....	98
Figura 97 – Atenuador variable .....	99
Figura 98 – Plataforma de pruebas [Configuración 2] .....	99
Figura 99 – Atenuador variable + combinador 8 bocas .....	100
Figura 100 – Conexión del cliente (OBM) al atenuador .....	101
Figura 101 – Conexión de los puntos de acceso al atenuador .....	101
Figura 102 – Detalle de la conexión del AP3.....	101
Figura 103 – Última versión de firmware liberada a 7/11/2023.....	102
Figura 104 – Configuración de flujos en IxChariot 9.2.....	103
Figura 105 – Detalle de configuración de flujo para prueba estática .....	104
Figura 106 – Ejemplo de resultado de prueba de throughput.....	104
Figura 107 – Cambio de ancho de banda del canal (20,40 u 80 MHz) .....	105
Figura 108 – Software para el manejo del atenuador variable.....	105
Figura 109 – WLAN Monitor con valores de ejemplo.....	106
Figura 110 – Valores de asociación con AP1 .....	106
Figura 111 – Pestaña “Expert WLAN settings – Beaconing” de la configuración.....	107
Figura 112 – Configuración de flujos en IxChariot 9.2 para pruebas de roaming.....	109
Figura 113 – Diagrama de atenuación de señal en escenario 1 .....	110
Figura 114 – Diagrama de atenuación de señal en escenario 2.....	110
Figura 115 – Nivel de señal, nivel de ruido y SNR con atenuación 0dB .....	112
Figura 116 – Rampa de atenuación del escenario 1 (CH1-3-7).....	113
Figura 117 – Rampa de atenuación del escenario 1 (CH2-4-8).....	113
Figura 118 – Rampa de atenuación del escenario 1 (CH3-6).....	114
Figura 119 – Rampa de atenuación del escenario 2 (CH1-3-7).....	114
Figura 120 – Rampa de atenuación del escenario 2 (CH2-5-8).....	115
Figura 121 – Rampa de atenuación del escenario 2 (CH3-6).....	115
Figura 122 – Pantalla con la finalización del test de Ixia (ejemplo).....	116
Figura 123 – Grabadores de tierra y tren configurados .....	117
Figura 124 – Cámara del tren emulada y configurada.....	118
Figura 125 – Tarea de descarga de grabaciones preparada.....	118
Figura 126 – Fichero de grabación en disco duro del grabador embarcado .....	118

Figura 127 – Valores configurados para los puntos de acceso (resumen) .....	119
Figura 128 – Simulación Depósito – Niveles de señal.....	120
Figura 129 – Simulación depósito – Niveles de señal en zona media .....	120
Figura 130 – Simulación Depósito - Niveles de ruido en zona media .....	121
Figura 131 – Simulación Depósito - SNR en zona media .....	122
Figura 132 – Simulación Depósito - Data Rate vista general.....	122
Figura 133 – Setup de la zona de pruebas en vía.....	123
Figura 134 – APs configurados para simulación de vía.....	123
Figura 135 – Simulación vía – nivel de señal (vista general) .....	124
Figura 136 – Simulación vía – nivel de señal a 350 metros del AP .....	124
Figura 137 – Simulación vía – nivel de interferencia/ruido .....	125
Figura 138 – Simulación vía – nivel de interferencia/ruido (mejor disposición de canales).....	126
Figura 139 – Simulación vía – SNR .....	126
Figura 140 – Simulación vía – Data Rate (vista general).....	127
Figura 141 – Simulación vía – Data Rate a 350 metros del AP .....	127
Figura 142 – Valores de throughput MCS9 20MHz .....	128
Figura 143 – Desvanecimientos/caídas en la tasa de throughput AP1 Canal 100.....	132
Figura 144 – Desvanecimientos/caídas en la tasa de throughput AP3 Canal 100.....	132
Figura 145 – Parámetros de configuración para OBM1 según test1 .....	133
Figura 146 – Resumen throughput para test1 .....	134
Figura 147 – Gráfica de throughput para test1 .....	134
Figura 148 – Gráficas de throughput de los test 1-9.....	136
Figura 149 – Niveles OBM1 asociado al AP1.....	138
Figura 150 – Niveles OBM2 asociado al AP1.....	138
Figura 151 – Resultado de la prueba con 2 clientes conectados al mismo AP .....	139
Figura 152 – Throughput total y por flujo.....	139
Figura 153 – Tarea de transferencia de ficheros.....	140
Figura 154 – Detalle de tasa de transferencia en descarga de grabaciones .....	140
Figura 155 – Splitter H&S 5504.17.0009 .....	142
Figura 156 – Pestaña “General” de la configuración .....	158
Figura 157 – Pestaña “Admin” de la configuración.....	159
Figura 158 – Pestaña “General” de la configuración .....	159
Figura 159 – Pestaña “Physical WLAN Settings>Operation” de la configuración .....	160
Figura 160 – Pestaña “Physical WLAN Settings>Radio” de la configuración.....	160
Figura 161 – Pestaña “Physical WLAN Settings (por defecto)” de la configuración .....	161
Figura 162 – Pestaña “Logical WLAN Settings>Network” de la configuración.....	162
Figura 163 – Pestaña “Logical WLAN Settings>Encryption” de la configuración .....	162
Figura 164 – Pestaña “Logical WLAN Settings>Transmission” de la configuración.....	163
Figura 165 – Pestaña “Logical WLAN Settings>Alarms” de la configuración.....	163
Figura 166 – Pestaña “Interfaces>LAN” de la configuración .....	164
Figura 167 – Pestaña “LAN>Ethernet Ports>LAN1” de la configuración .....	164
Figura 168 – Pestaña “LAN>Ethernet Ports>LAN2” de la configuración .....	165
Figura 169 – Pestaña “LAN>Port Table” de la configuración.....	165

Figura 170 – Pestaña “IPv4>General>IP networks...” de la configuración .....	166
Figura 171 – Pestaña “Routing>Ipv4 Routing table...” de la configuración.....	166
Figura 172 – Pestaña “Firewall/QoS>General” de la configuración .....	167
Figura 173 – Pestaña “Management>General” de la configuración.....	168
Figura 174 – Pestaña “Physical WLAN Settings>Operation” de la configuración .....	169
Figura 175 – Pestaña “Physical WLAN Settings>Radio” de la configuración.....	169
Figura 176 – Pestaña “Physical WLAN Settings>Client Mode” de la configuración .....	170
Figura 177 – Pestaña “LAN>Port table” de la configuración .....	170
Figura 178 – Pestaña “IPv4>IP networks...” de la configuración.....	171
Figura 179 – Pestaña “IP Router>Routing>IPv4 routing table...” de la configuración.....	171
Figura 180 – Pestaña “General” de la configuración (AP1, AP2 y AP3) .....	172
Figura 181 – Pestaña “Physical WLAN - Radio” de la configuración (AP1, AP2 y AP3).....	173
Figura 182 – Pestaña “IPv4>Ip networks” de la configuración (AP1, AP2 y AP3).....	174
Figura 183 – Pestaña “IP Routing>IPV4 routing table” de la configuración .....	174
Figura 184 – Pestaña “Management>General” de la configuración.....	175
Figura 185 – Pestaña “WLAN>Physical WLAN settings – Radio” de la configuración .....	176
Figura 186 – Pestaña “Expert WLAN settings – Beaconing” de la configuración.....	177
Figura 187 – Pestaña “Expert WLAN settings – Beaconing” de la configuración.....	178
Figura 188 – Pestaña “IPv4>General>IP networks” de la configuración.....	179
Figura 189 – Pestaña “Routing>IPv4 routing table” de la configuración .....	179
Figura 190 – Valores de throughput MCS9 20MHz .....	180
Figura 191 – Valores de throughput MCS8 20MHz .....	181
Figura 192 – Valores de throughput MCS6 20MHz .....	182
Figura 193 – Valores de throughput MCS4 20MHz .....	183
Figura 194 – Valores de throughput MCS2 20MHz .....	184
Figura 195 – Valores de throughput MCS9 40MHz .....	185
Figura 196 – Valores de throughput MCS8 40MHz .....	186
Figura 197 – Valores de throughput MCS6 40MHz .....	187
Figura 198 – Valores de throughput MCS4 40MHz .....	188
Figura 199 – Valores de throughput MCS2 40MHz .....	189
Figura 200 – Valores de throughput MCS9 80MHz .....	190
Figura 201 – Valores de throughput MCS8 80MHz .....	191
Figura 202 – Valores de throughput MCS6 80MHz .....	192
Figura 203 – Valores de throughput MCS4 80MHz .....	193
Figura 204 – Valores de throughput MCS2 80MHz .....	194
Figura 205 – Parámetros de configuración para OBM1 según test1 .....	195
Figura 206 – Resumen throughput para test1 .....	196
Figura 207 – Gráfica de throughput para test1 .....	196
Figura 208 – Resumen throughput para test2 .....	197
Figura 209 – Gráfica de throughput para test2 .....	198
Figura 210 – Resumen throughput para test3 .....	199
Figura 211 – Gráfica de throughput para test3.....	200
Figura 212 – Resumen throughput para test4 .....	201

Figura 213 – Gráfica de throughput para test4 .....	202
Figura 214 – Resumen throughput para test5 .....	203
Figura 215 – Gráfica de throughput para test5 .....	204
Figura 216 – Resumen throughput para test6 .....	205
Figura 217 – Gráfica de throughput para test6 .....	206
Figura 218 – Resumen throughput para test7 .....	207
Figura 219 – Gráfica de throughput para test7 .....	208
Figura 220 – Resumen throughput para test8 .....	209
Figura 221 – Gráfica de throughput para test8 .....	210
Figura 222 – Resumen throughput para test9 .....	211
Figura 223 – Gráfica de throughput para test9 .....	212

## Lista de Tablas

Tabla 1 – Resumen WiFi IEEE 802.11 [1] .....	23
Tabla 2 - Protocolo del estándar 802.11 .....	29
Tabla 3 - Modulación CCK – codificación de fase .....	30
Tabla 4 - Especificaciones del estándar 802.11ac [60].....	41
Tabla 5 - Subportadoras OFDM en 802.11ac [63].....	42
Tabla 6 – MCS 802.11ac (1 stream) [65].....	43
Tabla 7 – Resumen de bandas de frecuencia de espectro libre en 5GHz .....	63
Tabla 8 – Canales y frecuencias a usar en el sistema WiFi.....	64
Tabla 9 – BAT450-F Especificaciones Técnicas .....	72
Tabla 10 – EMP Protector - Especificaciones Técnicas .....	75
Tabla 11 – Antena de vía - Especificaciones Técnicas.....	75
Tabla 12 – SPUMA400 - Especificaciones Técnicas.....	77
Tabla 13 – RADOX - Especificaciones Técnicas.....	78
Tabla 14 – SENCITY RAIL EXCEL - Especificaciones Técnicas.....	79
Tabla 15 – Estudio económico .....	83
Tabla 16 – Tabla con los requisitos de potencia y sensibilidad MCS para 20MHz y MIMO 3x3 .....	87
Tabla 17 – SNR mínimo con los datos para 20MHz y MIMO 3x3.....	87
Tabla 18 – Cálculos teóricos para canales de 20MHz en distancia máxima.....	88
Tabla 19 – Cálculos teóricos para canales de 20MHz con una distancia de 350 metros.....	89
Tabla 20 – Tabla con los requisitos de potencia y sensibilidad MCS para 40MHz y MIMO 3x3 .....	89
Tabla 21 – SNR mínimo con los datos para 40MHz y MIMO 3x3.....	89
Tabla 22 – Cálculos teóricos para canales de 40MHz con una distancia de 350 metros.....	90
Tabla 23 – Tabla con los requisitos de potencia y sensibilidad MCS para 80MHz y MIMO 3x3 .....	90
Tabla 24 – SNR mínimo con los datos para 80MHz y MIMO 3x3.....	91
Tabla 25 – Cálculos teóricos para canales de 80MHz con una distancia de 350 metros.....	91
Tabla 26 – Valores MCS, SMR y RSSI para 3 flujos [44] .....	91
Tabla 27 – Valores del cliente y escenario de prueba definidos (tes1 al test5).....	111
Tabla 28 – Valores del cliente y escenario de prueba definidos (tes6 al test9).....	111



Tabla 29 – Valores definidos para el Test1 .....	112
Tabla 30 – Configuración de canales por AP .....	121
Tabla 31 – Tabla de datos del cliente para MCS9 20MHz.....	128
Tabla 32 – Tabla de resultados pruebas estáticas (20MHz).....	129
Tabla 33 – Tabla de resultados pruebas estáticas (40MHz).....	129
Tabla 34 – Tabla de resultados pruebas estáticas (80MHz).....	130
Tabla 35 – Tabla resumen con el throughput en Mbps obtenidos en las pruebas estáticas .....	131
Tabla 36 – Detalle de los valores de producto para canales de 40MHz .....	131
Tabla 37 – Equivalencia de % a dB/dBm en test1.....	133
Tabla 38 – Tabla de resultados pruebas dinámicas (40MHz).....	135
Tabla 39 – Resultados de throughput máximo, mínimo y media .....	137
Tabla 40 – Glosario del proyecto .....	143
Tabla 41 – Tabla de datos del cliente para MCS9 20MHz.....	180
Tabla 42 – Tabla de datos del cliente para MCS8 20MHz.....	181
Tabla 43 – Tabla de datos del cliente para MCS6 20MHz.....	182
Tabla 44 – Tabla de datos del cliente para MCS4 20MHz.....	183
Tabla 45 – Tabla de datos del cliente para MCS2 20MHz.....	184
Tabla 46 – Tabla de datos del cliente para MCS9 40MHz.....	185
Tabla 47 – Tabla de datos del cliente para MCS8 40MHz.....	186
Tabla 48 – Tabla de datos del cliente para MCS6 40MHz.....	187
Tabla 49 – Tabla de datos del cliente para MCS4 40MHz.....	188
Tabla 50 – Tabla de datos del cliente para MCS2 40MHz.....	189
Tabla 51 – Tabla de datos del cliente para MCS9 80MHz.....	190
Tabla 52 – Tabla de datos del cliente para MCS8 80MHz.....	191
Tabla 53 – Tabla de datos del cliente para MCS6 80MHz.....	192
Tabla 54 – Tabla de datos del cliente para MCS4 80MHz.....	193
Tabla 55 – Tabla de datos del cliente para MCS2 80MHz.....	194
Tabla 56 – Equivalencia de % a dB/dBm en test1.....	195
Tabla 57 – Equivalencia de % a dB/dBm en test2.....	197
Tabla 58 – Equivalencia de % a dB/dBm en test3.....	199
Tabla 59 – Equivalencia de % a dB/dBm en test4.....	201
Tabla 60 – Equivalencia de % a dB/dBm en test5.....	203
Tabla 61 – Equivalencia de % a dB/dBm en test6.....	205
Tabla 62 – Equivalencia de % a dB/dBm en test7.....	207
Tabla 63 – Equivalencia de % a dB/dBm en test8.....	209
Tabla 64 – Equivalencia de % a dB/dBm en test9.....	211

# 1. Introducció

## 1.1. Contexto y justificación del Trabajo

Hoy en día, la preocupación por el medio ambiente cada vez es más palpable y llega a ámbitos como el transporte. Dentro de esta preocupación los gobiernos de muchos países están fomentando la construcción o mejora de los sistemas ferrocarriles como medio sostenible de transporte.

A raíz del auge del sector ferroviario, aparece la necesidad de mantener una comunicación continua con los equipos embarcados. Para dar solución a este problema, se implantan sistemas inalámbricos, tales como GSM-R, TETRA, etc. Pero estos sistemas tienen el inconveniente de un ancho de banda, y velocidad, muy limitado por lo que se hace inviable el envío de cierta información.

Llegados a este punto, se introduce la idea para el presente proyecto: una red WiFi con tecnología 802.11ac para poder transmitir desde el tren (que está en vía o depósito) al puesto de control (tierra) toda la información necesaria.

El objetivo del proyecto es integrar una serie de equipos, *hardware* y aplicaciones *software*, para diseñar una red tren-tierra. Esto permite transmitir las grabaciones existentes en el tren a un sistema en tierra. Desde los atentados de Nueva York, y en especial el 11-M de Madrid, empresas como Metro de Madrid empezaron a reforzar los sistemas de CCTV (*Closed Circuit Television*) para vigilancia y análisis de posibles situaciones/incidencias. Estas grabaciones se usan a nivel judicial cuando se comete un delito, de ahí su importancia.

El resultado esperado en este proyecto es diseñar de un sistema de comunicaciones inalámbricas, tren-tierra, que permita el envío de la imagen tanto en parado (tren localizado en una cochera o depósito) como en movimiento (gracias al proceso de *roaming* entre puntos de acceso).

## 1.2. Objetivos del Trabajo

Los objetivos a alcanzar en este proyecto son:

- Integrar equipos embarcados (lado tren) y en vía (lado tierra).
- Simulación con software del tipo Ekahau o XIRIO (con la licencia de la UOC):
  - En una cochera (zona estática con cobertura WiFi).
  - En un tramo de 1 km.
- A partir de estos datos, definir una arquitectura WiFi 802.11ac para poder enviar tráfico a través de ella.
- Cálculo del máximo *throughput* a conseguir: teórico y práctico en laboratorio.
- Además, se va a integrar un equipo *Wireless LAN Controller* (WLC) -para la gestión centralizada de los equipos WiFi- y una plataforma virtual con el *software* comercial necesario para la función de descarga de grabaciones.
- Fuera del alcance del proyecto: equipos embarcados (grabador, cámaras y switches embarcados).

## 1.3. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad

Uno de los puntos fuertes del proyecto es que su uso se llevará a cabo en un entorno de transporte sostenible: el sector ferroviario. Si hay algo importante de cara al ámbito ético-social es la preocupación por el calentamiento global. Con el uso de transportes colectivos, que muevan en cada desplazamiento al mayor número de gente posible, se consigue una disminución de la contaminación. Además, en este proyecto todos los equipos disponen de certificado radioeléctrico para cumplir la normativa del país.

## 1.4. Enfoque y método seguido

Se han leído y analizado distintos productos que actualmente están en el mercado para decidir cuál es la mejor opción calidad-precio.

Empresas como Hirschmann, Huawei, Genetec, ... tienen productos implementados en el sector ferroviario con grandes resultados. Por tanto, la línea de trabajo será definirlos e integrarlos para conseguir el objetivo de diseñar un sistema de comunicaciones tren-tierra.

Para ello durante el desarrollo del proyecto, se seguirán tres fases: una teórica (descripción de la tecnología y cálculos previos), otra de simulación informática (comportamiento esperado de los equipos en campo) y la de pruebas en laboratorio (con los equipos especificados en el proyecto para comprobar su desempeño real).



## 1.5. Planificación del trabajo

Se ha dividido el trabajo en tareas agrupadas en las distintas PECs:

- PEC1: la planificación del proyecto.
- PEC2: teoría sobre las redes inalámbricas y el estándar elegido para el trabajo, IEEE 802.11ac.
- También se ha incluido un WLC y una plataforma virtual ya que, se utilizará ambos sistemas en la definición de la arquitectura del proyecto.
- PEC3: se divide en 2 bloques:
  - Por un lado, la parte teórica de la propuesta.
  - Por otro lado, la parte práctica:
    - Simulada/teórica
    - Laboratorio
- PEC4: los últimos retoques y controles de la memoria a entregar.

Además de los hitos, se han creado algunos puntos de control necesarios para el buen hacer de la memoria. Estos puntos han sido distribuidos por las distintas etapas para que sea sencillo detectar algún fallo/desvío o problema.

Por otro lado, se ha paralelizado la redacción de la parte teórica/simulación del proyecto con la parte práctica del laboratorio. Esta decisión se ha tomado para poder afrontar y adelantarse a los posibles problemas/retrasos que se produzcan en esa fase.

Los puntos de control son:

1. **31/10/23**: una vez terminado el primer bloque de la PEC2, al finalizar el estado del arte y al comienzo del bloque de Redes inalámbricas.
2. **13/11/23**: una vez finalizada la parte del WLC, para revisar todos los conceptos y desarrollos hechos sobre el tema tratado.
3. **27/11/23**: en este punto de control se enviarán algunos de los resultados de las pruebas simuladas.
4. **02/12/23**: en paralelo a las simulaciones y pruebas de laboratorio. La idea es revisar toda la parte de arquitectura definida, es decir, el objetivo principal de este proyecto de integración de tecnologías.
5. **27/12/23**: en este punto se darán los toques finales a la memoria y será el último punto de control.

A continuación, las capturas del diagrama:

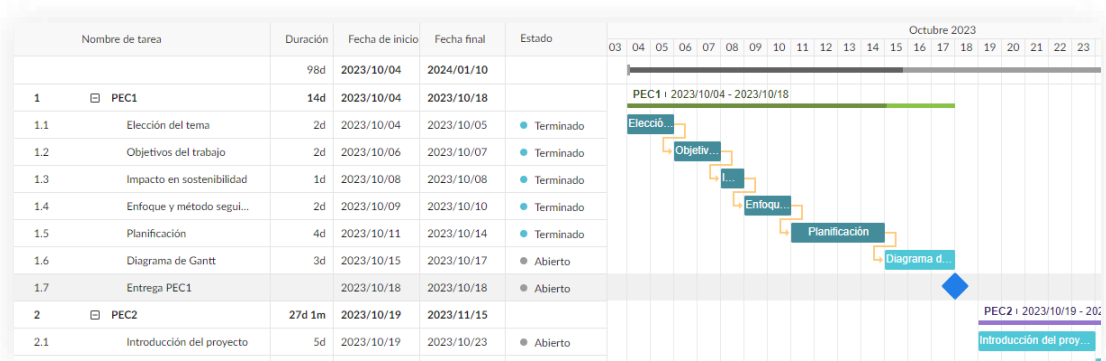


Figura 1 – Diagrama Gantt – Fase PEC1

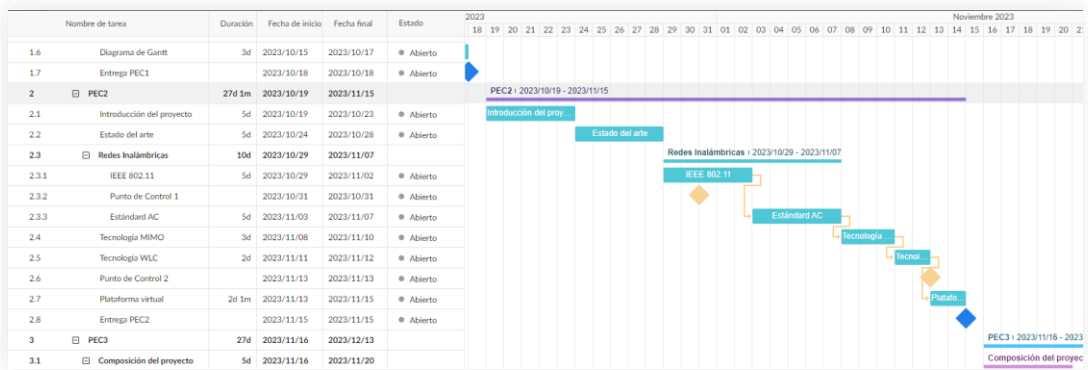


Figura 2 – Diagrama Gantt – Fase PEC2

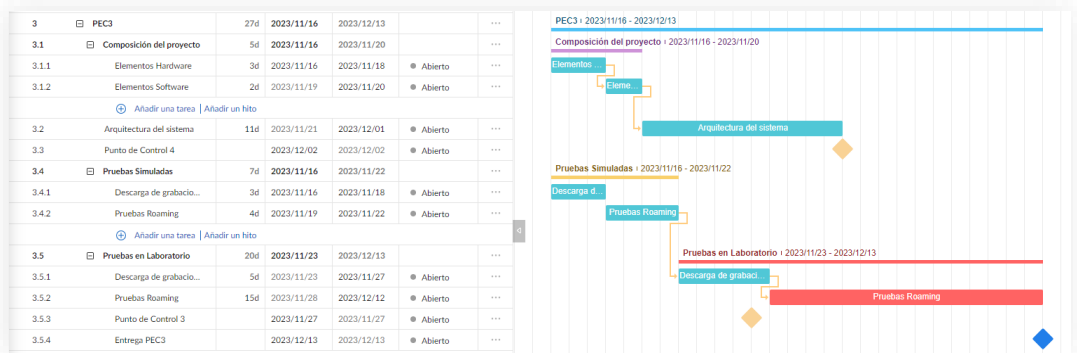


Figura 3 – Diagrama Gantt – Fase PEC3

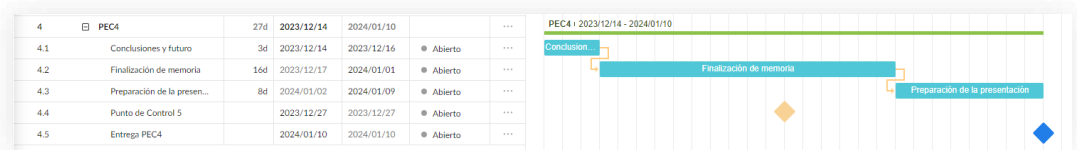


Figura 4 – Diagrama Gantt – Fase PEC4

## 1.6. Breve resumen de productos obtenidos

En cuanto a los productos obtenidos a lo largo del proyecto, se disponen de los siguientes:

- Caracterización de los equipos inalámbricos utilizando el estándar 802.11ac:
  - Nivel de potencia de la señal recibida mínimo o sensibilidad del equipo receptor.
  - Tasa de transferencia máxima alcanzada.
- Definición de la arquitectura para la transmisión tren-tierra de los equipos.
- Integración de los distintos interfaces de los sistemas:
  - *Wireless Lan Controller* virtual.
  - Descarga de grabaciones a través de la suite Security Center de Genetec.
- Exposición de las restricciones de instalación de los diferentes equipos que se especifican en el diseño de la arquitectura tren-tierra.

## 1.7. Breve descripción de otros capítulos de la memoria

En este apartado se describe, de manera general, la estructura del documento. Se hace especial énfasis en los apartados más relevantes:

- En el apartado **1 - Introducción** y subapartados se recoge toda la información sobre la planificación del proyecto, el enfoque escogido para la realización del trabajo y finalmente se ha incluido un diagrama de Gantt de las fases de cada agrupación de tareas.
- En el apartado **2 - Materiales y métodos** se recoge:
  - El estado del arte, qué existe en la actualidad en sistemas similares al proyecto que nos ocupa.
  - Toda la parte teórica sobre el estándar 802.11 y en concreto el 802.11ac que es el que se usará en la definición de la arquitectura tren-tierra propuesta.
  - Se incluye un apartado sobre tipos de modulación a usar en estos sistemas y poniendo especial énfasis en la modulación OFDM, que junto con la aplicación de la técnica MIMO, hacen posible el alcance de altas tasas de transferencia en los equipos.
  - Se expone también un apartado (**2.7.4 - Plan de frecuencias**) sobre el plan de frecuencias a utilizar y cómo se deciden los canales y frecuencia a aplicar sobre el sistema.
  - En el punto **2.7 - Composición del Proyecto**, se explica la arquitectura, los requisitos previos a cumplir y los elementos utilizados por el sistema descrito en este proyecto, tanto *hardware* como *software*. Además, se describen todos los elementos con sus funcionalidad y principales características.

- En el punto **2.7 - Composición del Proyecto** se expone, de una manera matemática, los cálculos del sistema previos a simulaciones y pruebas en laboratorio.
- En el punto **2.9 - Pruebas simuladas por software y 2.10 - Pruebas en laboratorio**, se hace una descripción de los métodos y formas en las que se desarrollan las pruebas simuladas y las de laboratorio.
- En el apartado **3 - Resultados** se expone de manera clara los resultados de todas las pruebas: simulación, estático y en movimiento del sistema.
- En el apartado **4 - Conclusiones y trabajos futuros**, se incluyen las conclusiones extraídas de las pruebas y los elementos a mejorar o desarrollar en detalle a futuro, en definitivamente, nuevas líneas de trabajo.
- En el apartado **5 - Glosario** se crea una tabla con las siglas y definiciones que se utilizan durante la exposición del proyecto.
- En el apartado **6 - Bibliografía** se recoge una lista de enlaces con toda la documentación y sitios web consultados durante el estudio y definición del sistema propuesto. Además, se ha creado un subapartado para figuras y tablas para poder referenciarlas de una manera más clara.
- Por último, en el apartado **7 - Anexos** se han incluido todos los documentos que pueden ser necesarios si se quiere profundizar, o aclarar, algún tipo de información que, por extensión del documento, se ha visto desplazada a esta parte del documento. También se incluyen los manuales de usuario que se han necesitado para la configuración de los equipos y las fuentes del estudio económico realizado. Por extensión del documento, el detalle de los resultados de las pruebas (con distintas figuras y tablas) se ha desplazado a este apartado.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Introducción del proyecto

*Tren Maya* es un proyecto del gobierno de México para desplegar una red ferroviaria en la península del Yucatán. Este hecho supone un hito tanto para el turismo, como para la movilidad de las personas que viven en la península del Yucatán y el transporte de mercancías.

En este proyecto se planea cubrir una distancia de 1500 kilómetros y construir:

- 20 estaciones
- 14 paraderos
- Talleres y Cocheras



Figura 5 – Diagrama Tren Maya [49]

La idea de este proyecto surgió ante la propuesta de dar cobertura tren-tierra a estos trenes para dos necesidades específicas:

- Descarga de grabaciones del sistema CCTV embarcado.
- Envío de información a algunos subsistemas del tren. Por ejemplo, actualizar los mensajes pregrabados para el sistema de megafonía.

Para ello se han seleccionado dos zonas en construcción para el diseño. Estas zonas se ubican cerca del aeropuerto de Cancún (uno de los lugares más turísticos de la zona).

Se van a contemplar los 2 escenarios posibles existentes:



- Un depósito de trenes en zona de taller y cocheras (ver Figura 6):

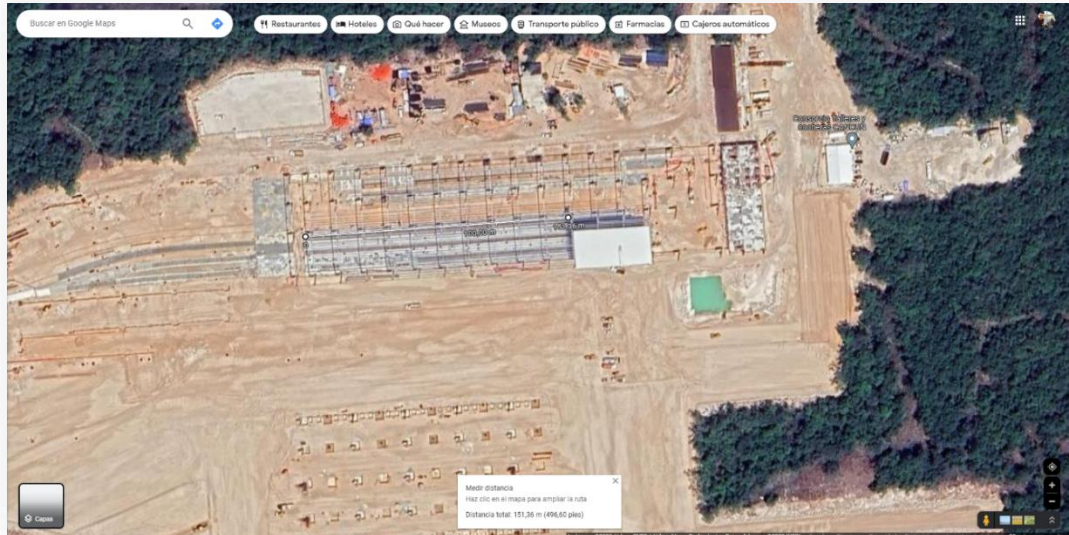


Figura 6 – Depósito cercano a la estación de Cancún

- Un recorrido, de un kilómetro de distancia, en vía para implementar la comunicación en movimiento (ver Figura 7):

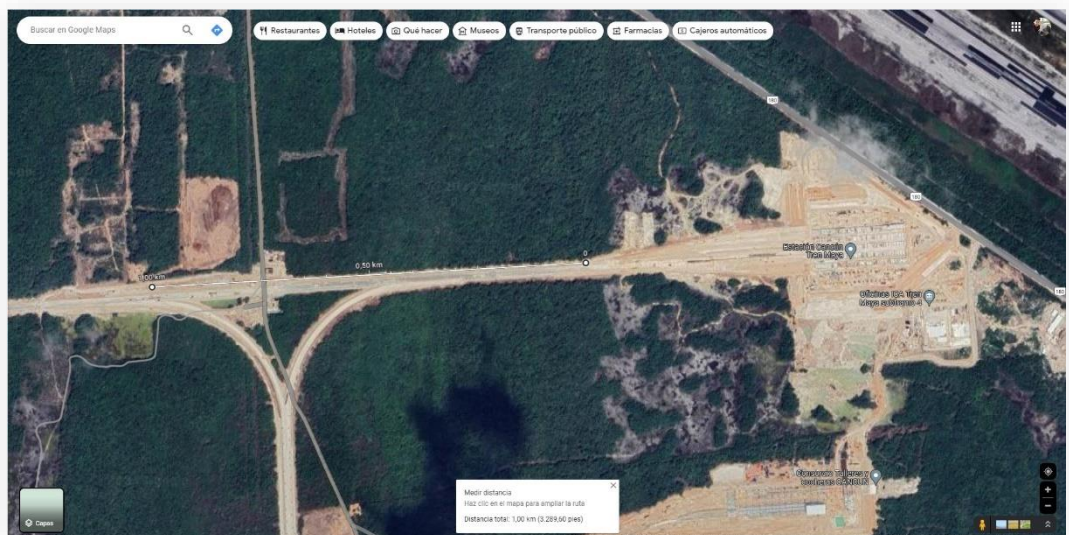


Figura 7 – Recta de entrada a estación de Cancún

Con todo esto, se contempla tanto el *throughput* en una zona controlada y estática (depósito) como en movimiento (entrada de una estación). Al caracterizar estos dos escenarios, se extraen las conclusiones necesarias para proveer de cobertura de sistema WiFi a toda la línea.

## 2.2. Estado del arte

Para abarcar el planteamiento anterior, se procede a evaluar el *throughput* máximo que un sistema basado en WiFi5 (802.11AC) puede alcanzar.

Si se observa el estado actual de las transmisiones radio en el sector ferroviario, se encuentran servicios de señalización y comunicación.

A continuación, se detallan las tecnologías existentes en el sector:

- **GSM-R (*Global System for Mobile Communications for Railways*):** este sistema se utiliza para la comunicación con el puesto de mando y para la señalización (voz y datos). Se utilizan las siguientes bandas [1]:
  - Subida: entre 876 MHz y 880 MHz
  - Bajada: entre 921 MHz a 925 MHz

Se aplica en sistemas de señalización ferroviaria como el ERTMS (*European Rail Traffic Management System*) nivel 2. Este sistema permite la seguridad ferroviaria. Para ello, utiliza una comunicación constante del posicionamiento del tren, a lo largo de la vía, a los enclavamientos de seguridad. Con esto, el tren va aplicando las limitaciones de velocidad máxima a la que puede circular según las condiciones de la vía. En este caso, se obtiene una velocidad de transferencia máxima de 57Kbps [2].

**TETRA (*Trans European Trunked Radio*):** este sistema se usa para comunicaciones de voz y utiliza las bandas por pares de frecuencia. Una de las frecuencias es ocupada para la comunicación *Downlink* DL (sentido estación base a móvil) y la otra para la comunicación *Uplink* UL (sentido móvil a estación base) [3]:

- Emergencias:
  - ✓ 380-383 MHz / 390-393 MHz
  - ✓ 383-385 MHz / 393-395 MHz
- Públicas:
  - ✓ 410-420 MHz / 420-430 MHz
  - ✓ 870-876 MHz / 915-921 MHz
  - ✓ 450-460 MHz / 460-470 MHz
  - ✓ 385-390 MHz / 395-399,9 MHz

Este sistema es definido por la *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) y constituye un sistema móvil y digital de Radio. En este caso, la velocidad de transferencia máxima es de 10Kbps.

Los dos sistemas comentados anteriormente sirven para tareas de seguridad y comunicación, pero en el sector ferroviario se ha abierto, desde hace años, otras necesidades multimedia que han hecho crecer la aplicación de otros estándares para la comunicación.

Grandes entornos ferroviarios, como Metro de Madrid o Renfe, han añadido a sus servicios funcionalidades extra, como [4][5]:

- Banda Ancha para viajeros (WiFi).
- Monitorización del CCTV desde puestos de control (tanto en las estaciones como dentro de los trenes).
- Anuncios publicitarios en los monitores que incluyen los trenes (Línea 3 de Metro de Madrid y sus unidades del modelo 3000).

Actualmente, Metro de Madrid tiene el sistema TEBATREN [5] para la visualización de cámaras embarcadas en los trenes y el envío de cierta información:

- Opera en banda de 1.7 GHz para la comunicación de tren-tierra
- Opera en la banda de 2.4 GHz para la comunicación tren-tren
- Usa WiFi con el protocolo IEEE 802.11g
- Alcanza una velocidad máxima de transferencia de 54Mbps a nivel de radio (a nivel de aplicación, teniendo en cuenta paquetes de control, cabeceras... la tasa de transmisión se ve bastante reducida).
- Se utiliza una combinación de antenas y cable radiante para garantizar la cobertura radio.

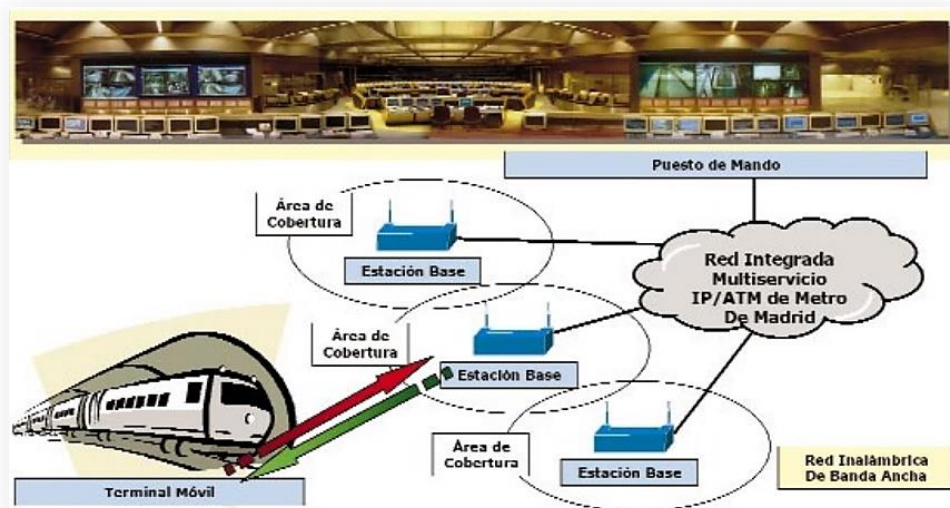


Figura 8 – TEBATREN Metro de Madrid [50]



Este proyecto empezó como piloto en 2008 y la velocidad de transferencia requerida era menor a la que se pueden encontrar en proyectos como *Tren Maya*, o en cualquier proyecto actual donde las cámaras tienen una resolución de 720p/1080p y, por lo tanto, el tamaño de los ficheros de grabaciones aumenta a varios cientos de megabits por segundo.

Para este tipo de servicios se necesita más tasa de transferencia (Mbps). Esto lo pueden proporcionar los distintos estándares 802.11 de WiFi que se encuentran hoy en día.

Si se hace una comparativa rápida, en próximos apartados se hará un análisis más concreto y detallado, se pueden observar las diferencias entre los distintos protocolos que se han ido publicando a lo largo de los últimos años:

Tabla 1 – Resumen WiFi IEEE 802.11 [1]

Protocolo	Frecuencia	Ancho del canal	MIMO	Velocidad de datos máxima (en teoría)
802.11ax	2,4 o 5 GHz	20, 40, 80, 160 MHz	Usuario múltiple (MIMO-MU)	2,4 Gbps <sup>1</sup>
802.11ac wave2	5 GHz	20, 40, 80, 160 MHz	Usuario múltiple (MIMO-MU)	1,73 Gbps <sup>2</sup>
802.11ac wave1	5 GHz	20, 40, 80 MHz	Un solo usuario (SU-MIMO)	866,7 Mbps <sup>2</sup>
802.11n	2,4 o 5 GHz	20, 40 MHz	Un solo usuario (SU-MIMO)	450 Mbps <sup>3</sup>
802.11g	2,4 GHz	20 MHz	No se aplica	54 Mbps
802.11a	5 GHz	20 MHz	No se aplica	54 Mbps
802.11b	2,4 GHz	20 MHz	No se aplica	11 Mbps
Tradicional 802.11	2,4 GHz	20 MHz	No se aplica	2 Mbps

<sup>1</sup> 2 transmisiones espaciales con modulación 1024-QAM.

<sup>2</sup> 2 transmisiones espaciales con modulación 256-QAM.

<sup>3</sup> 3 transmisiones espaciales con modulación 64-QAM.

Observando la evolución de los protocolos a lo largo de los años, se puede asegurar que el estándar WiFi ha alcanzado un buen nivel de madurez y ha sido extendido en diferentes ámbitos. La confianza en este estándar ha derivado en la elección del mismo para este proyecto.

Por otro lado, para simular cobertura, tasa de transferencia, interferencias, etc. El proyecto va a hacer uso de herramientas de simulación, y de algunas pruebas en laboratorio, que aproximarán los resultados a los datos reales que se obtendrán en campo. Con todo ello, se

podrá definir un replanteo de la localización de los puntos de acceso, antes de ejecutar el proyecto en campo.

Algunas de estas herramientas son:

- **Ekahau:** tiene una amplia gama de productos en el mercado para la simulación y medida de la cobertura WiFi [7]. Para este proyecto se tiene acceso al producto “Sidekick”. Es un *software* comercial, y licenciado, con el que se podrá simular la cobertura WiFi en el plano. Así poder realizar un replanteo inicial de las posiciones donde los puntos de acceso serán ubicados en campo.



Figura 9 – Ekahau Sidekick

La Figura 10 muestra un ejemplo de la interfaz gráfica del *software* de simulación:

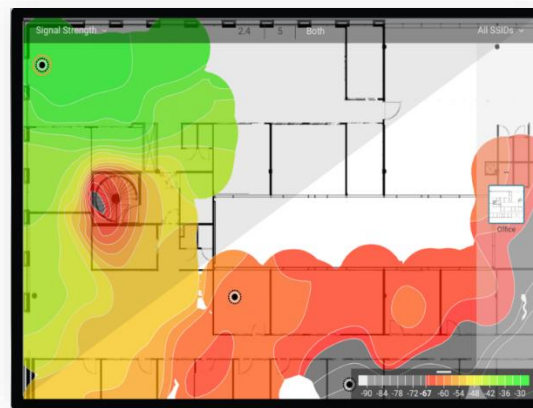


Figura 10 – Ejemplo de interfaz gráfica del *software* Ekahau [51]

En ella se puede observar, de manera bastante gráfica, los distintos niveles de señal y *throughput*. Los colores en progresión de verde a rojo indican los niveles de cobertura (de mayor a menor).

En este caso, se importarán los planos de las zonas a cubrir y, a partir de ahí, se empezará a trabajar en el diseño del sistema.

- XIRIO ONLINE:** es una herramienta web [8] que permite cálculos radioeléctricos utilizando la cartografía real de la zona. En este caso se usará una licencia de la UOC para poder realizar las simulaciones. A continuación, una imagen de la interfaz gráfica de la herramienta:

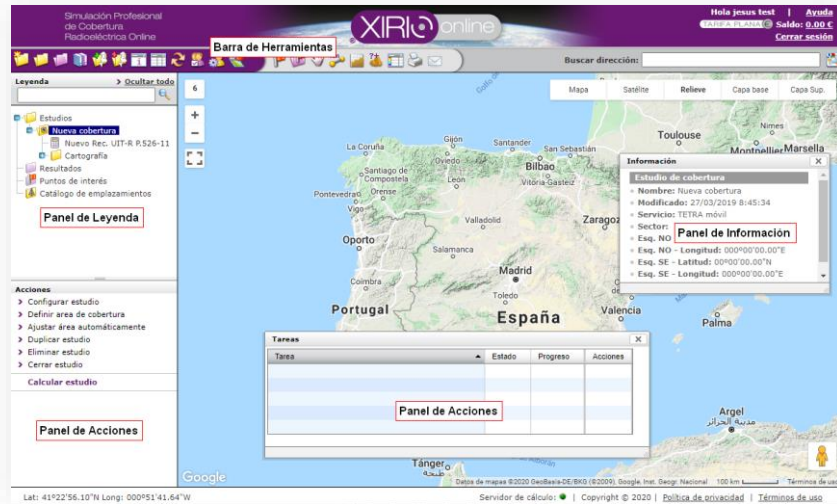


Figura 11 – Ejemplo de interfaz gráfica de XIRIO ONLINE

Al igual que con la herramienta anterior, se muestra una gama de colores para identificar las zonas en las que la cobertura radio será peor (rojo):

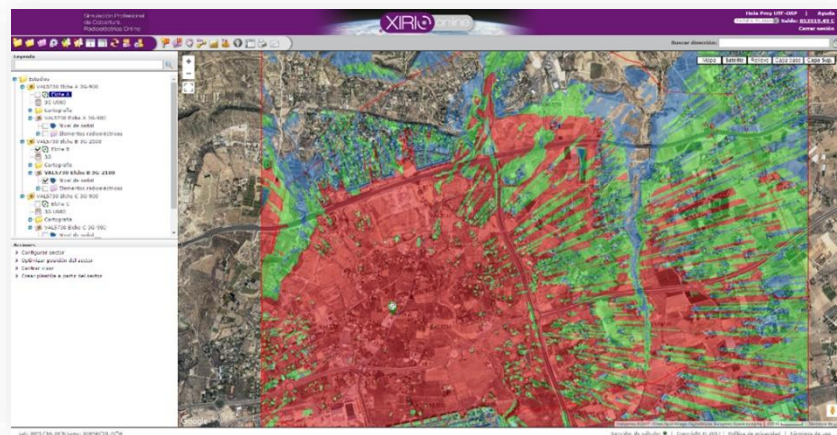


Figura 12 – Ejemplo de cobertura radio en XIRIO ONLINE [52]

Otro de los temas a tratar en este proyecto es la implementación de un WLC (*Wireless LAN Controller*). Este dispositivo se encarga de gestionar los puntos de acceso repartidos en la línea de una manera centralizada [9] y [10].

Gracias a herramientas y dispositivos como los WLC, se puede monitorizar, administrar y configurar los puntos de acceso desde una sola herramienta. Una de las funcionalidades

más destacables del WLC es la capacidad de gestionar la asignación de canales a utilizar por el sistema. En este caso existen 2 opciones a contemplar:

- La asignación de manera estática (establecida en la configuración de los puntos de acceso y clientes)
- Asignación gestionada por el propio sistema basándose en algoritmos y el estado de la línea (SNR, nivel de señal...).

**NOTA:** Normalmente la elección del WLC depende de la familia de puntos de acceso a utilizar.

Desde un punto de vista radio, el WLC es capaz de supervisar de forma centralizada los puntos de acceso controlados, lo que permite modificar en tiempo real parámetros de radiofrecuencia que optimicen el rendimiento del sistema o bien optimizar el *throughput* por usuario empleando el balanceo de carga, como ejemplo.

En lo que respecta a la instalación, el WLC facilita el aprovisionamiento y despliegue de dispositivos (usando el protocolo CAPWAP o el LWAPP, que emplea mensajes cifrados con sus vecinos) así como la modificación de parámetros de configuración.

En cuanto a la seguridad, es posible desplegar fácilmente las actualizaciones de software y parches de seguridad a toda la flota de equipos de forma centralizada, así como la gestión centralizada de VLANs de invitados.

Finalmente, el WLC es capaz de gestionar la autorización de acceso mediante el uso de certificados X.509 evitando el *spoofing* de puntos de acceso confiables y que los clientes puedan conectarse a puntos de acceso *rogue*.

En este punto se pueden contemplar dos posibilidades:

- **WLC Hardware:** existe un componente hardware que incluye esta funcionalidad a través de su Firmware.



Figura 13 – WLC hardware [9]

- **WLC Software:** se instala un software en una máquina de tierra (puede ser un ordenador personal, un servidor, una plataforma virtual...) y se controlan los puntos de acceso a través de la aplicación [10].

Para este proyecto se usará un WLC virtual, es decir, se opta por la opción software.

Siguiendo con las tecnologías que se van a utilizar durante el desarrollo de este proyecto, se procede a describir el software para la descarga de grabaciones. Aunque el objetivo principal es la red WiFi, la integración con un software de descarga de grabaciones es algo contemplado como funcionalidad extra y la forma en la que se va a concluir este proyecto.

En el mercado de la videovigilancia y la seguridad uno de los grandes líderes es Genetec [11] con su plataforma software “Security Center”.

Las principales funcionalidades de Omnicast (software encargado de CCTV) son:

- Flujo continuo de video: gestiona el *throughput* y el almacenamiento de forma eficaz.
- Grabación de video: incluye la posibilidad de transferir los videos almacenados en otros equipos ajenos al sistema a un *Archiver* (nombre que reciben los grabadores en este sistema).

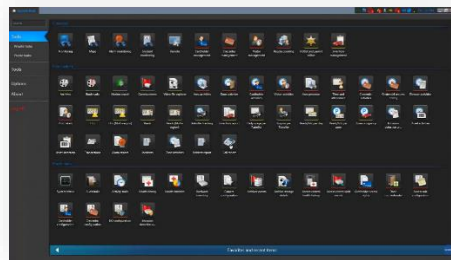


Figura 14 – Genetec Security Center [11]

Por último, y para cerrar la arquitectura del sistema, lo más habitual es tener una plataforma virtual que permita gestionar de una manera más eficiente las distintas máquinas que se van a utilizar. Estas plataformas tienen un coste elevado, pero permiten un mejor mantenimiento del sistema. Por lo tanto, se pueden hacer copias de seguridad de las máquinas y recuperarlas ante fallo fatal.

Actualmente, se puede implementar el SW ESXi de VMware [12] e instalarlo sobre plataformas *hardware* de DELL o Huawei [13].



Figura 15 – Servidor DELL EMC para ESXi [12]



Figura 16 – Servidor Huawei Fusion para ESXi [13]



## 2.3. Redes inalámbricas

En estos apartados se expone una descripción de qué son las comunicaciones inalámbricas, sus protocolos y las tecnologías a utilizar en la arquitectura a definir en el mismo.

De manera general se entiende por comunicación inalámbrica aquella en la que la transmisión de datos se produce a través del aire (ondas electromagnéticas).

Una de las principales ventajas es eliminar toda la parte de cableado ethernet/fibra en el enlace de estas redes. Sin embargo, se añade el problema de la seguridad, puesto que las transmisiones radio son más vulnerables.

### 2.3.1. IEEE 802.11

Se puede definir el estándar 802.11 como una familia de protocolos/normas creadas por el IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) [14], [15] y [16].

El estándar 802.11 define la capa física (PHY) y la capa de acceso al medio (MAC, *Media Access Control*) de la arquitectura OSI:

- En la capa PHY se definen los siguientes parámetros:
  - Frecuencia de operación
  - Ancho de Banda
  - Modulación
  - Tipo de antenas
  - Tasa de datos
  
- En la capa MAC se tiene la definición de:
  - Modos de acceso al medio
  - Proceso de autenticación
  - Entrega de tramas/*frames*
  - En MAC también se incluyen funciones de control de flujo y gestión de errores. Se evita así la congestión de la red, se minimizan las colisiones y se mitigan y controlan los errores de transmisión.

También se establecen los requisitos de calidad de la señal radioeléctrica (tales como relación señal-ruido) y la mínima potencia de señal recibida necesaria para garantizar la tasa de transferencia y una conexión de calidad.

Aunque la primera versión de este estándar apareció en 1997, la primera aceptada de una manera masiva fue la 802.11b. A lo largo de los años aparecieron distintas versiones que mejoraron o corrigieron las anteriores.

A continuación, un resumen de las principales versiones como:

Tabla 2 - Protocolo del estándar 802.11

Estándar	Año	Frecuencia	Velocidad Máxima (teórica)	Ancho de Banda	Modulación
802.11b	1999	2.4 GHz	11 Mbps	22 MHz	DSSS, CCK
802.11a	1999	5 GHz	54 Mbps	20 MHz	OFDM
802.11g	2003	2.4 GHz	54 Mbps	20 MHz	OFDM
802.11n	2009	2.4/5GHz	450 Mbps	20/40 MHz	MIMO-OFDM
802.11ac (WiFi 5)	2013	5 GHz	1.7 Gbps	20/40/80/160 MHz	MIMO-OFDM
802.11ax (WiFi 6)	2019	2.4/5 GHz	2.4 Gbps	20/40/80/160 MHz	MIMO-OFDM

Como se puede observar en la Tabla 2, la evolución de los protocolos ha permitido una mejora de la velocidad máxima de transmisión de datos del sistema. Dichas mejoras se han alcanzado gracias a la utilización de la multiplexación OFDM, modulaciones de mayor orden, configuraciones con múltiples antenas (MIMO), agregación de canales, etc.

La modulación es una técnica que permite, sobre una frecuencia portadora, transmitir una señal. Se debe señalar en qué consisten las distintas modulaciones vistas en la Tabla 2, poniendo especial atención en la modulación OFDM, que junto con la técnica MIMO, es lo que implementa el estándar, 802.11ac, elegido para el desarrollo de este proyecto:

- DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum):** en castellano se puede traducir como “espectro ensanchado por secuencia directa” [17] y [53]. Se utiliza para transmitir datos en la banda de frecuencia 2,4 GHz. Para ello, esta técnica expande la señal de datos en una señal, con mayor ancho de banda, utilizando un código de secuencia pseudoruido (una secuencia binaria pseudoaleatoria). Esta señal expandida se transmite por la frecuencia disponible en el canal WiFi y se minimiza el impacto de posibles interferencias en esa comunicación inalámbrica. Una vez en el receptor se deshace la expansión aplicada, utilizando el mismo patrón de secuencia de pseudoruido, y se recupera la señal original. Esto aplica un extra de seguridad, en cierta medida, debido a que el receptor necesita saber la secuencia para lograr descifrar los datos. Como curiosidad, habría que indicar que esta tecnología también se usa en otros estándares inalámbricos como el *Bluetooth*.

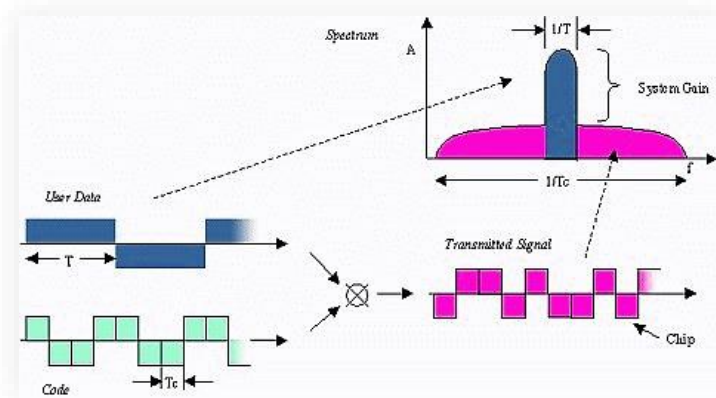


Figura 17 – Modulación DSS (Direct Sequence Spread Spectrum) [53]

- CCK (Complementary Code Keying):** en castellano se traduce como “codificación de código complementario” [18] y [54]. En este caso, la técnica consiste en combinar dos secuencias de codificación complementarias para transmitir los datos en la banda de 5GHz. Se tiene una amplitud constante con desplazamiento de fase modulada para transmitir los datos. En la modulación anterior, DSSS, se utilizaba una frecuencia constante y se modulaba con la amplitud.

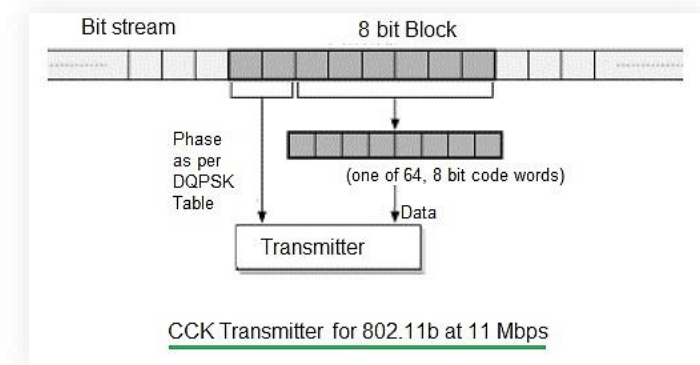


Figura 18 – Modulación CCK (Complementary Code Keying) [54]

En la Figura 18, y a modo de ejemplo, se observa el CCK para transmitir a 11Mbps. Los bits se agrupan en bloques de 8 bits, 2 de estos bits están codificados por cambio de fase respecto al símbolo anterior. Los otros 6 bits se codifican usando CCK.

Tabla 3 - Modulación CCK – codificación de fase

Dibits	Fase (pares)	Fase (impares)
00	0 grados	$\pi$
01	$\pi/2$	$3*(\pi/2)$
10	$\pi$	0 grados
11	$3*(\pi/2)$	$\pi/2$



- **OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing):** en castellano “multiplexación por división de frecuencias ortogonales” [21]. Es un sistema de modulación multiportadora. Los datos a transmitir se combinan como señales de banda estrecha ortogonales (dos señales, en este caso las portadoras, se consideran ortogonales si el producto escalar es cero).

Esta modulación es la utilizada por el estándar 802.11ac y se tratará en profundidad en el apartado 2.3.3.

## 2.3.2. Técnica MIMO

Llegados a este punto, se procede a describir la técnica de comunicaciones llamada **MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)**. En castellano se podría traducir como “múltiples-entrada múltiples-salida” [19]. Esta técnica consiste en usar múltiples antenas para transmitir los datos simultáneamente. Esto aumenta la velocidad de transmisión gracias a la multiplexación espacial (múltiples antenas).

En la implementación de sistemas WiFi actuales, y concretamente en el 802.11ac en que se basa este proyecto, se instalan varias antenas, en emisor y receptor, para mejorar la eficiencia espectral y aumentar la velocidad de transmisión. Usando la multiplexación OFDM se divide la señal de datos en múltiples subportadoras, ortogonales, para luego modular cada una de ellas con 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM o 1024-QAM. Esto posibilita tener múltiples flujos espaciales simultáneamente sobre el mismo canal y aumentar así la capacidad de transmisión.

De las modulaciones QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) antes mencionadas cabe indicar que cada una de ellas tiene un número diferente de bits por símbolo y, por lo tanto, distintos niveles de amplitud y fase ( $2^n$  símbolos):

- 16-QAM: se dispone de 4 bits por símbolo. Con ello se tienen 16 amplitudes y fases distintas para cada símbolo.
- 64-QAM: se dispone de 6 bits por símbolo. Por lo tanto, 64 amplitudes y fases distintas para cada símbolo.
- 256-QAM: se dispone de 8 bits por símbolo. Esto son 256 amplitudes y fases distintas para cada símbolo.
- 1024-QAM: se dispone de 10 bits por símbolo. Así que, se tienen 1024 amplitudes y fases distintas para cada símbolo.

Cuanto mayor sea el orden de la modulación, mayor será la velocidad de transmisión que se puede lograr, pero cabe destacar que, se reduce la tolerancia a ruido e interferencia en el canal. Al aumentar el número de símbolos a utilizar en la modulación, la distancia que los separa es menor. Ante un fallo en la recepción, ruido o interferencias, al sistema final le

resulta más complicado identificar y recuperar dicha señal. Además, puede llegar a confundirla con un símbolo cercano.

En la Figura 19 se puede observar cómo los símbolos están más cerca unos de otros, en la modulación QAM-64, porque donde antes se representaban 4 por cuadrante (QAM-16) ahora se sitúan 16 (QAM-64).

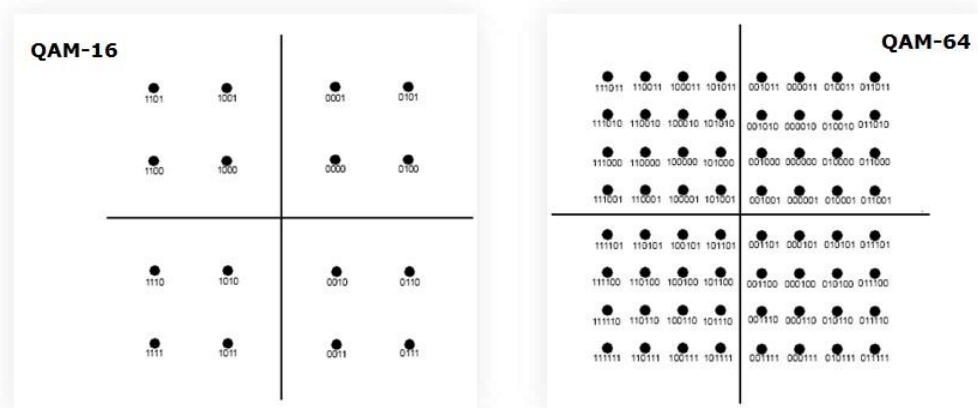


Figura 19 – 16-QAM vs 64-QAM de manera ideal [55]

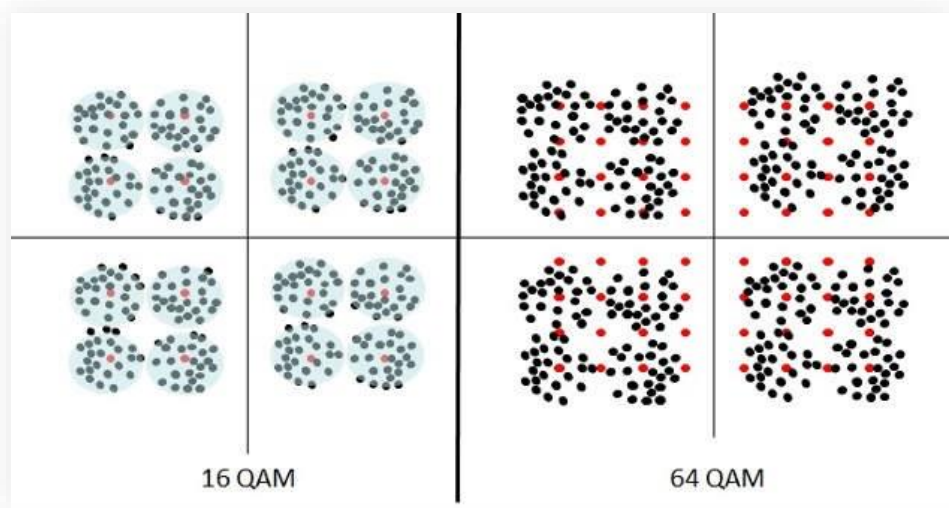


Figura 20 – 16QAM vs 64 QAM de manera no ideal [55]

Si se sigue analizando la Figura 19 (ideal), y se añade la Figura 20 (recibidos), se constata que según aumenta el número de símbolos la distancia entre ellos se reduce. Por lo que, la probabilidad de interpretar erróneamente un símbolo en el receptor a causa del ruido/interferencia en el canal aumenta.

En el caso de la técnica MIMO, lo innovador es que gracias al aumento de las antenas, en el emisor y receptor, se pueden aprovechar los rebotes (multicaminos) de las señales. Esto implica que no es necesario que la señal llegue sólo de forma directa.

Para señalar de una manera más gráfica esta técnica, se muestra a continuación un gráfico (ver Figura 21) con la diferencia entre las modalidades: SISO (*Single-Input Single-Output*), SIMO (*Single-Input Multiple-Outputs*), MISO (*Multiple-Inputs Single-Output*) y MIMO:



Figura 21 – SISO vs SIMO vs MISO vs MIMO

En la figura anterior se refleja que, dependiendo del número de antenas en emisor y receptor, existen distintas combinaciones posibles en las técnicas de envío de flujos.

Para MIMO se aprovecha, en ambos extremos de la comunicación, una técnica llamada diversidad espacial. Esto consiste en generar subcanales paralelos, equivalentes y también independientes. Estos subcanales generan una ganancia con la que se construye una matriz:

Channel 1, 1 .... Channel 1,n  
 Channel 2,1 .... Channel 2,n  
 Channel 3,1 .... Channel 3,n

El tamaño de esta matriz depende de las características de las antenas y de la potencia de los equipos que las llevan instaladas. Por ejemplo, en la Figura 22, se muestran los canales generados en una transmisión MIMO. En este caso, el sistema genera 3 subcanales por antena y receptor:

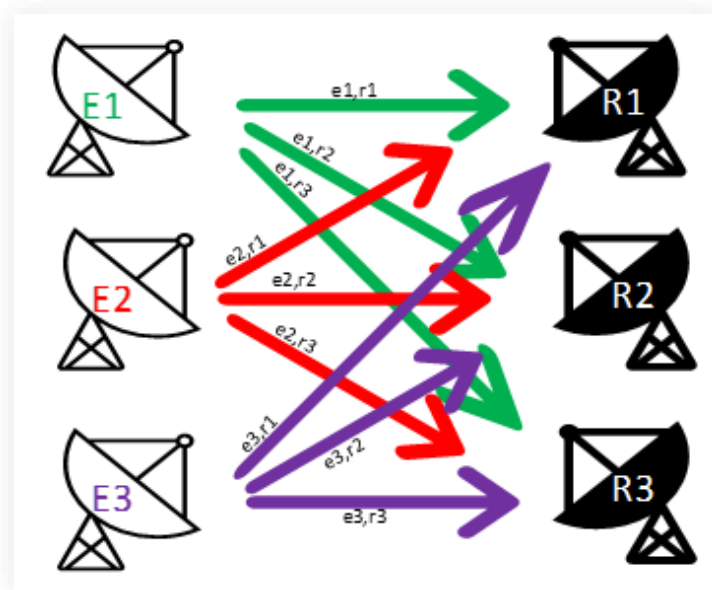


Figura 22 – Ejemplo de subcanales MIMO

Una vez expuesto lo anterior, y para terminar de explicar esta técnica, se deben señalar dos conceptos muy importantes: *beamforming* y rutas no directas.

En cuanto al *beamforming* [20], o *conformación de haces*, es una tecnología que sirve para focalizar la señal que emite, por ejemplo, un punto de acceso hacia una dirección concreta. Las señales se debilitan con la distancia, y con los obstáculos que haya a su paso, pero con esta técnica el haz de la señal se enfoca para dirigirlo al sitio concreto que se desea, en este caso la antena del receptor. Por tanto, se cambia de una emisión omnidireccional a una que se direcciona hacia el punto deseado.

Para que el equipo logre identificar hacia dónde debe dirigir esa señal existen dos tipos de *beamforming*:

- Explícito: el emisor y el receptor intercambian señales para conocer la posición de cada uno en el espacio.
- Implícito: la comunicación no es bidireccional. Por lo tanto, el emisor es el encargado de enviar las señales y descubrir la posición del receptor. La principal ventaja es que como el emisor es el que implementa esta tecnología, se puede utilizar con clientes antiguos en los que el *beamforming* no estaba implementado.

La tecnología de focalización de la señal que usa *beamforming* se llama *directional sensing*. A través de ella, los equipos se localizan en el espacio en tiempo real. Otro de los puntos fuertes de esta tecnología es que no sólo analiza el nivel de señal, sino que tiene en cuenta la calidad de la comunicación (interferencias/ruidos) para escoger el punto dónde se debe focalizar la señal.

Por último, y para explicar la aplicación del *beamforming* junto con MIMO, se debe imaginar un sistema de 3 antenas en emisión y 3 en la recepción:

- Cada antena está apuntando en una dirección distinta.
- Antes de establecer el enlace las antenas emiten con la misma potencia, por lo tanto, una vez que comienza a funcionar la transmisión, y las antenas reciben información del receptor, el sistema tiene datos suficientes para ubicarse en el espacio y decidir la/s antena/s que va a utilizar en dicho enlace.
- De esta forma se consigue la optimización de la antena en uso, la mejora de la calidad y la estabilidad de la señal.

Sólo queda un concepto a explicar, de los mencionados en párrafos anteriores: las rutas no directas. Este punto se explicará en el siguiente apartado (ver **2.3.3**) durante el concepto de propagación por trayecto múltiple (Figura 23).

### 2.3.3. Modulación OFDM

El desarrollo del estándar 802.11ac utiliza la tecnología MU-MIMO (*MultiUser Multiples Input Multiples Outputs*) y la modulación OFDM para conseguir el aumento de la velocidad de transmisión y el ancho de banda. En este apartado se explicará en qué consiste dicha modulación.

Para explicarlo en profundidad hay que recordar el concepto de multiplexación FDM (*multiplexación por división de frecuencias*). Esto consiste en que diferentes flujos de información se asignan a canales de frecuencia (paralelos) y separados. Esta separación se basa en una banda de guardia de frecuencia para reducir la interferencia entre canales adyacentes [21].

Además, de debe tener en cuenta los conceptos de interferencias existentes en la transmisión radio: ISI (*intersymbol interference*) e ICI (*inter-carrier interference*):

- ISI: este efecto se produce cuando un símbolo interfiere con símbolos posteriores con lo que el efecto es similar al ruido. Esto provoca interferencia en la señal y errores de transmisión. La principal causa que genera este efecto es:
  - Propagación por trayecto múltiple: la señal emitida desde el emisor al receptor tiene distintos caminos: unos serán directos y otros serán rebotes de la señal. Tal y como se observa en la siguiente Figura 23, la señal llegará primero por el camino A (el más corto), después por el B y por último por el C. Estas llegadas se producen en distintos momentos temporales. Esto hace que al receptor llegue varias réplicas de la misma señal.

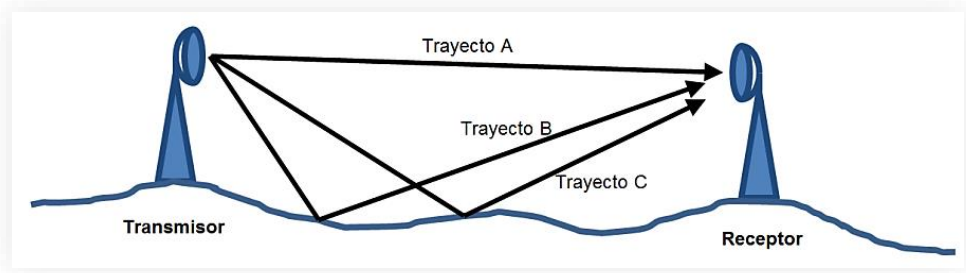


Figura 23 – Propagación por trayecto múltiple [56]

- ICI: esta interferencia viene provocada por la pérdida de la sincronización del sistema en el dominio del tiempo y la frecuencia y como efecto es el empeoramiento de la tasa BER (*Bit Error Rate*).

En el caso de OFDM existen las siguientes particularidades:

1. Múltiples portadoras (subportadoras/*subcarriers*) que transportan el flujo de información.
2. Las subportadoras son ortogonales entre sí.
3. Agrega un intervalo de guarda a cada símbolo. De esta manera se minimiza la interferencia entre símbolos y el retardo del canal.

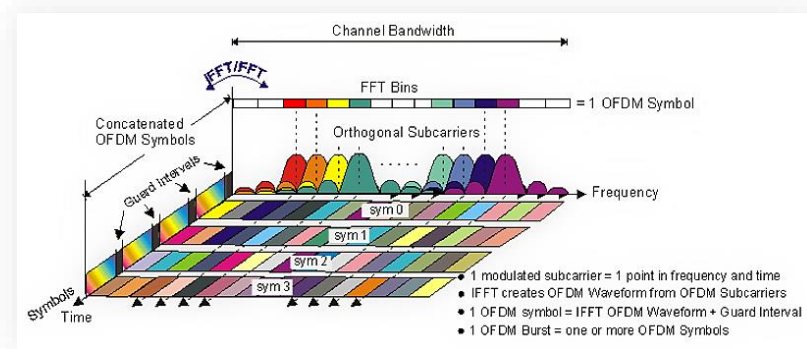


Figura 24 – Representación tiempo-frecuencia de una señal OFDM [57]

Tal y como se observa en la Figura 24, se relaciona la señal en el dominio del tiempo y con el dominio de la frecuencia. Para esto:

- En el dominio de la frecuencia, múltiples subportadoras (también llamadas tonos) se modulan de manera independiente con datos complejos.
- Se realiza una FFT inversa (transformada rápida de Fourier), en el dominio de la frecuencia, para producir el símbolo OFDM en el dominio del tiempo.
- Después, en el dominio del tiempo, se añaden intervalos de guarda entre cada símbolo. De esta manera se evitan interferencias entre símbolos en el



receptor. Estas interferencias vienen causadas por el retardo en la propagación de la señal por trayectos múltiples en la señal de radio.

- En este punto existe la posibilidad de concatenar múltiples símbolos para crear la ráfaga OFDM final.
- En el receptor se realiza una FFT sobre los símbolos OFDM para recuperar la cadena de bits de los datos de usuario original.

Es decir, se utiliza el concepto de la transformada de Fourier de un pulso rectangular en el dominio del tiempo por el que se obtiene una sinc:

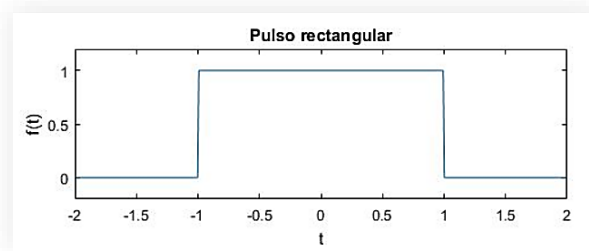


Figura 25 – Pulso rectangular en el tiempo [58]

Se dispone de un pulso  $y(t) = A\Pi\left(\frac{t}{\tau}\right)$  que está activo durante un intervalo de tiempo (al que se le denominará tau,  $\tau$ ) y después es nula. Se puede decir que la señal se transmite durante un tiempo y después se cesa en la transmisión de dicha señal.

Si se aplica la transformada de Fourier de ese pulso, se obtiene lo siguiente  $A\tau\text{sinc}(f\tau)$ . Esta es una señal de amplitud  $A\tau$  y tiene nulos en  $1/\tau, 2/\tau, 3/\tau$ :

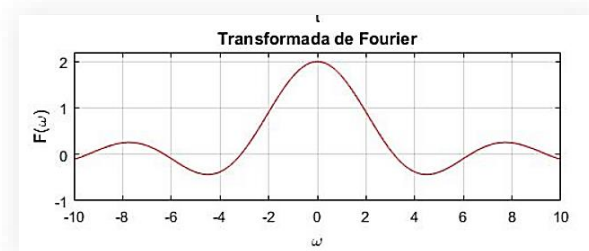


Figura 26 – Transformada de Fourier de un pulso (sinc) [58]

Esto permite introducir otras señales sinc superpuestas, siempre y cuando se asegure que la separación en frecuencia entre ellas es  $1/\tau$ .

Lo que hace esta modulación es establecer una ventana temporal  $\left(\Pi\left(\frac{t}{\tau}\right)\right)$  que multiplica a cada símbolo. Por lo que, si se tiene un conjunto de símbolos en paralelo:  $x_0, x_1, \dots, x_n$ , a estos símbolos se les va a multiplicar por la ventana  $\Pi\left(\frac{t}{\tau}\right)$ . Al hacer esta multiplicación en el tiempo se crea ese conjunto de sinc en el mismo espectro, cada una de ellas modulada con la amplitud del símbolo ( $x_0, x_1, \dots, x_n$ ).

Con esto se consigue que en el espectro cada símbolo esté modulado en una *sinc* y que cada *sinc* sea ortogonal a la contigua, evitando interferencias entre ellas.

Aunque se tenga los símbolos colocados ortogonalmente en el espectro, sigue habiendo una posibilidad de interferencia, lo que se llama el efecto 'eco'. En la siguiente figura se describe paso a paso este efecto y su mitigación usando el Prefijo Cíclico (CP) [22]:

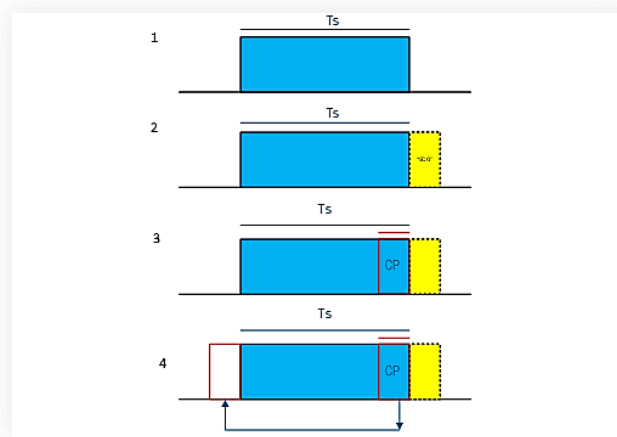


Figura 27 – OFDM - Prefijo cíclico

1. Se tiene una ventana temporal de período  $T_s$ .
2. En esta ventana existe una zona de interferencia de símbolo, eco, que puede afectar al siguiente. Esta zona aparece marcada en amarillo.
3. Para mitigar esto, se define el Prefijo Cíclico (CP), que es una porción de la parte final del símbolo. Se ha marcado esta zona con una línea roja.
4. Se copia el CP al principio del símbolo, es una copia directa. Teniendo en cuenta que el símbolo anterior tiene ecos que afectan a una porción que no es importante. Por lo que se puede decir que el CP contiene toda la ISI del símbolo anterior.

En la siguiente figura se muestran tres símbolos con su CP concatenado para entender cómo, gracias al CP, el ISI pierde importancia.

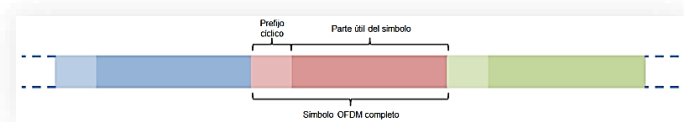


Figura 28 – OFDM - Prefijo cíclico en 3 símbolos [59]

Aquí se observa un dato importante sobre el que reparar. Si el eco tiene una duración mayor al CP, se estaría perdiendo esta ventaja, puesto que la interferencia sí afectaría al símbolo siguiente. Esto implica que la duración de la CP debe ser superior a la máxima dispersión del canal de propagación. Por lo tanto, se puede afirmar que el CP es dependiente del entorno de propagación y de la dispersión temporal que se pueda esperar.

Con todo lo anterior, se consigue que la señal transmitida ( $X$ ), un vector de símbolos al que se le aplica la transformada inversa de Fourier (IFFT), pase del dominio de la frecuencia al del tiempo. Esto se comporta, respecto al canal en frecuencia ( $H$ ), como una convolución circular. Si a la recepción se aplica la transformada de Fourier directa (FFT), se obtiene la señal recibida  $Y$ .

Llegados a este punto, y gracias al CP, eliminado en el receptor, se evita la interferencia entre símbolos (ISI). Además, se consigue que  $Y = X \cdot H$ , una multiplicación lineal entre la respuesta en frecuencia del canal y los símbolos transmitidos.

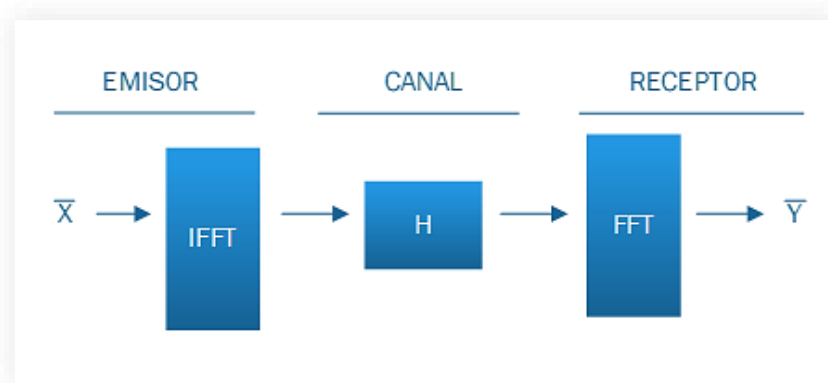


Figura 29 – OFDM – Emisor - Canal – Receptor

Resumiendo, OFDM es un mecanismo matemático que se basa en la transformada de Fourier de una ventana temporal.

### 2.3.3.1. Relación OFDM y MU-MIMO

En este apartado se va a describir en qué está basado un sistema MIMO-OFDM ([23] y [24]) dado que en los apartados anteriores se desarrollaron ambos temas de manera independiente.

OFDM es un modo muy especial de transmisión en multiportadora y, como ya se ha visto, consiste en emitir señales en diferentes frecuencias para poder aprovechar las estructuras multitrayecto en la propagación de la señal en el medio.

Se usa banda estrecha al dividir el canal en varios subcanales. Es entonces cuando, gracias a la ortogonalidad de las portadoras, se evita la superposición de subcanales y las señales se reciben sin interferencias de portadoras colaterales. Aquí se desarrolla también los procesos prefijo cíclico y transformadas de Fourier que se comentó en el apartado anterior.

Los sistemas que implementan MIMO-OFDM se apoyan en ambas tecnologías para su funcionamiento:

- Primero: existe una codificación de los datos de usuario en un bloque para codificar el canal.
- Segundo: se analizan los datos por el codificador. Y es aquí cuando las señales (símbolos y subportadoras) son inyectados al modulador. El modulador está conectado con cada una de las antenas del sistema transmisor.
- Tercero: se le aplica una demodulación OFDM. Aquí se requiere un sistema detector MIMO para recuperar y restaurar la señal recibida eliminando/mitigando la interferencia entre antenas de dicha transmisión.
- Cuarto: existe un decodificador de canal. Se encarga de corregir los bits erróneos. Con esto se reducen errores y obtiene una mejor BER (*Bit Error Rate*).

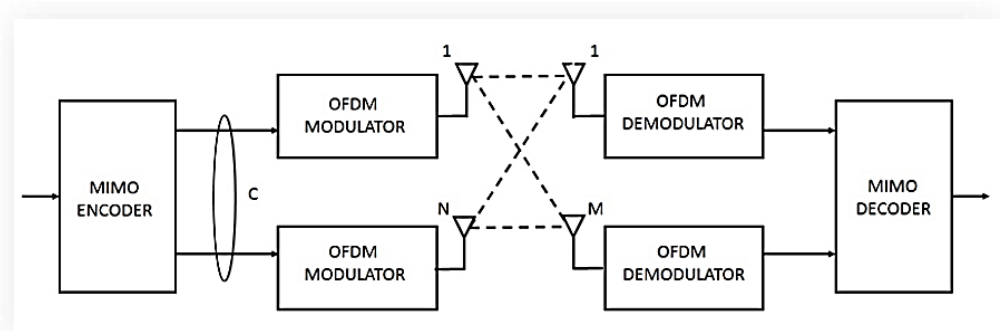


Figura 30 – OFDM+MIMO esquema típico [61]

### 2.3.4. Estándar 802.11ac

Una vez vista la técnica MIMO y la modulación OFDM se dispone de toda la información necesaria para entender las mejoras implementadas en el protocolo 802.11ac. Este estándar se desarrolló entre 2011 y 2013 para mejorar el 802.11n. Este estándar fue aprobado finalmente en 2014 [25].

La mejora principal frente a su predecesor es la tecnología MIMO explicada en los apartados anteriores. En la 802.11n, aunque podía usar varias antenas para el envío de datos esto se veía limitado a un único usuario a la vez. Por lo que el estándar 802.11ac se centró en la mejora en el uso de la tecnología MU-MIMO (*Multi User-MIMO*). Es decir, poder enviar y recibir datos de varios usuarios en paralelo sin que estos flujos se interfirieran entre ellos.

802.11ac opera en la banda de 5GHz, obteniendo una mejora en la velocidad de transmisión (teórica) de 1.3Gbps con posibilidad de llegar a 6.9Gbps en la última revisión del estándar, ver Tabla 4.

Como se ha visto anteriormente, a la tecnología que permite transmitir varios flujos para ser utilizados por varios usuarios se le llamó MU-MIMO (*Multi User MIMO*). Con esta tecnología

lo que se consigue es que, al tener múltiples antenas, se pueden enviar datos a varios usuarios al mismo tiempo.

Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, la tecnología MIMO con la modulación OFDM se unen en este estándar para ampliar la tasa de transferencia.

A continuación, una tabla resumen sobre el estándar 802.11ac:

Tabla 4 - Especificaciones del estándar 802.11ac [60]

	802.11ac Wave 1	802.11ac Wave 2	802.11ac Especificación IEEE
<b>Frecuencia Operación</b>	5 GHz	5 GHz	5 GHz
<b>MIMO</b>	Single User (SU)	Multi User (MU)	Multi User (MU)
<b>Velocidad (Gbps)</b>	1.3	2.34– 3.47	6.9
<b>Ancho de banda (MHz)</b>	20,40, 80	20,40, 80,80+80, 160	20,40, 80, 80+80,160
<b>Modulación</b>	256 QAM	256 QAM	256 QAM
<b>Spatial Streams</b>	3	3-4	8

En la tabla anterior, se puede observar que se ha incrementado el orden de modulación a 256-QAM [25]. Esto hace que aumente un 33% la tasa de datos respecto al 802.11n. Este hito se consigue utilizando 8 bits codificados por símbolo en las subportadoras (existían 6 bits en el 802.11n). Aunque esto provoca que se necesite una mayor SNR (*Signal to Noise Ratio, relación señal ruido*), debido a que los símbolos están más cerca unos de otros.

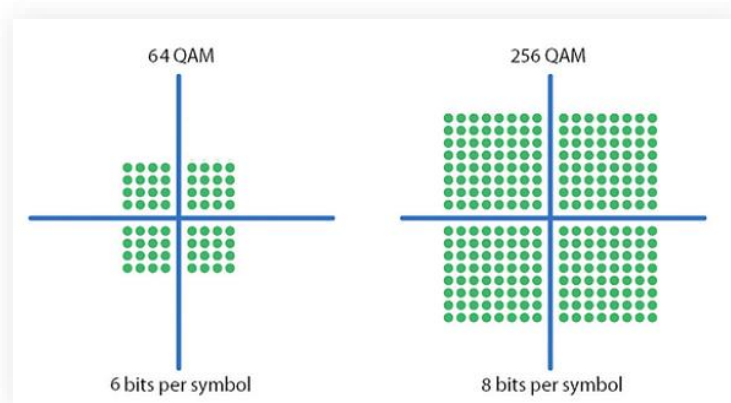


Figura 31 – 64-QAM vs 256-QAM [62]

El intervalo de guarda usado anteriormente era de 800ns, pero se ha añadido uno opcional para reducirlo a 400ns. En el caso de OFDM, el estándar 802.11ac divide las subportadoras con anchos de banda de 321.4 KHz cada una:

Tabla 5 - Subportadoras OFDM en 802.11ac [63]

BW (MHz)	20	40	80	160
FFT Size	64	128	256	512
Subportadoras de Datos	52	108	234	468
Subportadoras Pilotos	4	6	8	16
Total Subportadoras	56	114	242	484
Índice Subportadoras	$\pm(1-28)$	$\pm(2-58)$	$\pm(2-122)$	$\pm(6 - 126)$ $\pm(130 - 50)$

Dependiendo del ancho de banda, existe un número de subportadoras de datos y pilotos:

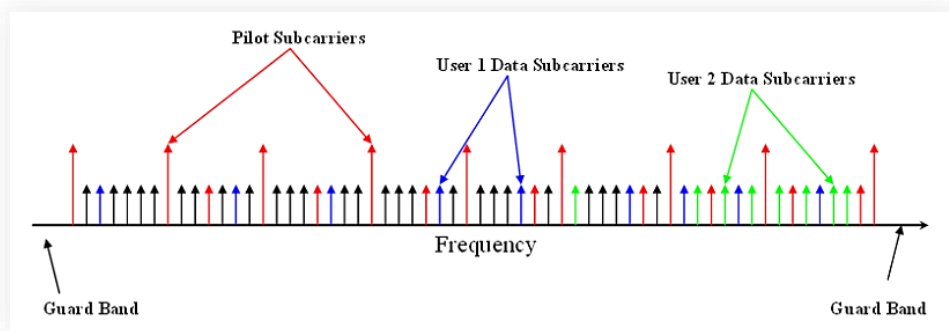


Figura 32 – Tipos de subportadoras (OFDM) [64]

- Subportadoras de datos: se utilizan para transmitir datos.
- Subportadoras piloto: se utilizan con fines de sincronización.

Otro de los conceptos a tener en cuenta en este estándar es el MCS (*Modulation and Coding Scheme* o *Esquema de Codificación y Modulación*). En el 802.11ac aparecen 2 bits más: 8 y 9 por lo que se tiene 10 índices (0 – 9).

Explicado de otra manera, se puede decir que el índice MCS indica la velocidad de transferencia de la conexión. Al comenzar la comunicación, se negocia el índice MCS entre el dispositivo emisor y receptor.

En la página de Cisco [26] se encuentra la tabla MCS para 802.11ac. Se ha extraído una parte (ver Tabla 6) para explicar los datos que se indican en la misma (y que se tendrán en cuenta de cara al proyecto).



Tabla 6 – MCS 802.11ac (1 stream) [65]

Spatial Streams	VHT MCS Index	Modulation	Coding Rate	20 MHz		40 MHz		80 MHz		160 MHz / 80+80 MHz	
				Data Rates (Mb/s)	Data Rates (Mb/s)	Data Rates (Mb/s)	Data Rates (Mb/s)	Data Rates (Mb/s)	Data Rates (Mb/s)		
				800ns GI	400ns GI	800ns GI	400ns GI	800ns GI	400ns GI	800ns GI	400ns GI
1	0	BPSK	1/2	6.5	7.2	13.5	15.0	29.3	32.5	58.5	65.0
	1	QPSK	1/2	13.0	14.4	27.0	30.0	58.5	65.0	117.0	130.0
	2	QPSK	3/4	19.5	21.7	40.5	45.0	87.8	97.5	175.5	195.0
	3	16-QAM	1/2	26.0	28.9	54.0	60.0	117.0	130.0	234.0	260.0
	4	16-QAM	3/4	39.0	43.3	81.0	90.0	175.5	195.0	351.0	390.0
	5	64-QAM	2/3	52.0	57.8	108.0	120.0	234.0	260.0	468.0	520.0
	6	64-QAM	3/4	58.5	65.0	121.5	135.0	263.3	292.5	526.5	585.0
	7	64-QAM	5/6	65.0	72.2	135.0	150.0	292.5	325.0	585.0	650.0
	8	256-QAM	3/4	78.0	86.7	162.0	180.0	351.0	390.0	702.0	780.0
	9	256-QAM	5/6	n/a	n/a	180.0	200.0	390.0	433.3	780.0	866.7

A continuación, se explica cada uno de los conceptos que aparecen en la Tabla 6:

- *Spatial Streams*: es el número de canales a utilizar en la comunicación. Por cada canal se necesita una antena. Para el ejemplo de la figura anterior, como se indica que *Spatial Streams* es igual a uno, la comunicación se hará con una sola antena.
- *VHT MCS Index (Very High Throughput, Modulation and Coding Scheme Index)*: indica el índice MCS para los datos que vienen a continuación, VHT es la trama de muy alto rendimiento del estándar 802.11ac, ver apartado **2.3.4.1**.
- *Modulation (Modulación)*: indica el orden de modulación, es decir, el tipo de modulación que se utiliza para codificar los datos.

En esta tabla se observan cuatro tipos de modulación diferentes:

- *BPSK (Binary Phase Shift Keying)*: se codifica 1 bit por símbolo. Se modula la fase con el desplazamiento de 2 símbolos. Diferencia entre símbolos máxima (180°). Tiene la mayor inmunidad al ruido.

- QPSK (*Binary Phase Shift Keying*): se codifica 2 bits por símbolo. En esta modulación se observan 4 fases.
- 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*): se codifican 4 bits por símbolo. Esta modulación incluye amplitud y fase sobre los que aplicar la modulación.
- 64-QAM: se codifican 6 bits por símbolo.
- 256-QAM: se utilizan 8 bits por símbolo en esta modulación. Esta se ha incluido en el 802.11ac como novedad.

Como se ha comentado anteriormente, al aumentar el número de bits por símbolo, se acorta la distancia entre ellos y se requiere un mayor SNR (*signal-to-noise ratio* o *relación señal-ruido*) para evitar interferencias. La ventaja de aumentar los bits de modulación es que permite enviar más información en los paquetes/tramas porque se existen más bits disponibles para datos.

- Coding Rate (Tasa de Codificación): indica qué parte del rendimiento son datos útiles. Por ejemplo, si se indica en la tabla un valor de  $\frac{3}{4}$ , se puede asegurar que tres de cada 4 bits son datos útiles y el cuarto está relacionado con la protección contra errores.
- Data Rate (Velocidad de Datos): este valor indica la velocidad (teórica) de transmisión. Depende del ancho de banda del canal (20 MHz, 40 MHz, 80 MHz y 160 MHz (80+80) y del tiempo del GI (Intervalo de Guarda).

Por último indicar que para alcanzar los índices MCS más altos, existen requisitos SNR y de potencia de salida de la señal que deben recibir los equipos.

### 2.3.4.1. Capa física

En este apartado se describen los campos que componen una trama en 802.11ac [25]. Para este estándar la trama es idéntica al anterior añadiendo, al final de la trama, nuevos campos para VHT (*Very High Throughput* o *Muy Alto Rendimiento*).

Como este estándar usa la técnica MU-MIMO, se necesita indicar el número de flujos (*streams*) a utilizar en la comunicación. De esta manera, los receptores se preparan para recibirlos.

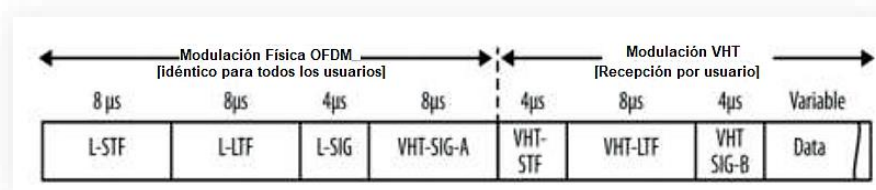


Figura 33 – Trama VHT en 802.11ac [66]

- **L-STF:** 12 símbolos OFDM para 20 MHz. Ayudan al receptor a identificar el inicio de una trama 802.11, sincronización y selección de antena.
- **L-LTF:** 52 subportadoras para canales de 20 MHz. Su función es la decodificación de los campos L-SIG y VHT-SIG-A.
- **L-SIG:** en 802.11a se usa para indicar la velocidad de datos y la longitud de trama.
- **VHT-SIG-A:** 2 símbolos de 24 bits (VHT-SIG-A1 y VHT-SIG-A2). Es el primer campo VHT y cada símbolo lleva la información necesaria para ser decodificada a su llegada al receptor.
- **VHT-STF:** similar al L-STF y se usa para control de ganancia en MIMO y para sincronización.
- **VHT-LTF:** se usa en el receptor para la estimación del canal MIMO y para la demodulación de la trama.
- **VHT-SIG-B:** indica la longitud del campo de datos y el índice MCS para cada usuario (transmisión multiusuario).
- **DATA:** un número variable de símbolos OFDM que lleva la información útil y depende del campo L-SIG.

### 2.3.4.2. Subcapa MAC

Esta capa se encarga de coordinar el acceso de los dispositivos al medio (canal de transmisión) [25].

Las novedades en este apartado están relacionadas con las mejoras de la capa física (PHY). Por ello, se deben destacar dos cambios implementados:

1. La longitud de trama se ve ampliada y pasa de 8000 a 11000 bytes (de manera aproximada).
2. Se reutiliza el campo "HT Control", implementado en 802.11n, redefiniendo el formato para la trama VHT:
  - a. Si el valor es igual a 0: el formato es el del estándar 802.11n (tipo HT).
  - b. Si el valor es igual a 1: el formato es el del estándar 802.11ac (tipo VHT).

Otras características de la subcapa MAC son:

- a) Agregación de tramas: con esto lo que se busca es mejorar el rendimiento de la red para poder transmitir varias tramas en el momento de acceder al canal. Para el 802.11ac las tramas son de formato A-MPDU ("Aggregate MAC Protocol Data Unit" o *Unidad de datos del protocolo MAC agregado*). Lo que significa que, esta capa se encarga del *framing* (proceso de empaquetamiento de los datos antes de ser transmitidos por la red inalámbrica). En este proceso, se estructuran los datos en

frames con información de: control, dirección origen, destino, etc. Por lo tanto, la capa física solo trabaja con la longitud total de la trama.

En este caso, como se usan velocidades altas de transmisión, la longitud de trama requiere un elevado número de bits. Lo que implica que la longitud máxima se define por tiempo (5,484 ms).

- b) Tramas de administración: se encargan de comunicar, entre los dos dispositivos, las capacidades y operaciones VHT. Esta información consiste en:
- i. Configurar el funcionamiento y la operación del estándar 802.11ac.
  - ii. Canal y velocidades básicas soportadas por el transmisor. Por ejemplo, las soportadas por todos los clientes que se conectan al mismo punto de acceso.
- c) Procedimientos de acceso al medio: en este estándar se incluyen nuevos ancho de banda de canal (80 y 160 MHz). Por lo tanto, es necesario establecer nuevas reglas de acceso para identificar si el canal está libre.

Para el caso de 80 MHz existen 2 condiciones:

- i. Se siguen las reglas EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*) en el canal primario. Estas reglas consisten en utilizar técnicas para el acceso al medio. Esto es, asignar diferentes prioridades a los distintos tipos de tráfico en la red inalámbrica. Por lo tanto, el canal primario necesita estar inactivo por un tiempo DIFS (*Distributed Inter-Frame Space*) más la duración del contador de *backoff*. El DIFS es el tiempo de espera mínimo, que se debe cumplir después de que un dispositivo ha detectado que el canal del medio está inactivo, antes de que se puedan transmitir datos. Por otro lado, el contador *backoff* es una técnica utilizada para evitar colisiones de datos en la red inalámbrica. Si dos o más dispositivos intentan transmitir datos al mismo tiempo, se produce una colisión, retrasando así la transmisión de los datos. El *backoff* ayuda a evitar estas colisiones, permitiendo que los dispositivos esperen tiempos aleatorios antes de continuar transmitiendo, lo que reduce las posibilidades de colisión.

Resumiendo, el dispositivo debe esperar un tiempo fijo (DIFS) y uno variable que depende de la congestión de la red (*backoff*). Esto ayuda a garantizar que los datos se transmitan de manera confiable y sin colisiones.

- ii. Un canal primario se puede dividir, en tres subcanales secundarios, para aumentar la capacidad de transmisión de datos en la red inalámbrica. Estos tres subcanales secundarios a su vez deben haber estado inactivos durante el período de PIFS (*Point Coordination Function Interframe Space*) antes de que el contador de *backoff* expire.

El PIFS es un intervalo de tiempo más corto que el DIFS. Se utiliza para garantizar que los paquetes de alta prioridad se transmitan, más rápido que los paquetes de baja prioridad, en el canal inalámbrico. Por lo que se puede afirmar que el PIFS es similar al DIFS, pero utilizado específicamente para los paquetes de alta prioridad.

Llegados a este punto se debe plantear una duda: ¿qué pasaría si cualquier subcanal secundario estuviera ocupado?. En este caso, la estación puede seguir cualquiera de las reglas de acceso siguientes (se continúa en 80 MHz):

- Acceso Estático al canal: la estación elige un período de espera (*backoff*) al azar dentro de la ventana para reiniciar al proceso y reintentar la transmisión.
- Acceso Dinámico al canal: intentará usar un canal más pequeño (20 o 40 MHz) pero esto es dependiente del CCA de cada sub-canal (Clear Channel Assessment). El CCA es un mecanismo utilizado en las redes inalámbricas para determinar si un canal de radio está libre o si está siendo utilizado por otro dispositivo (escuchando el canal). Esto permite seguir transmitiendo usando una fracción del ancho de banda originario.

### 2.3.4.3. Banda de frecuencias en 802.11ac

En el caso de 802.11ac, ya se ha señalado que trabaja a 5GHz de frecuencia y usa canales con ancho de banda de canal de 20, 40, 80 y 160 MHz. En la siguiente figura se puede observar el reparto de las frecuencias y canales.

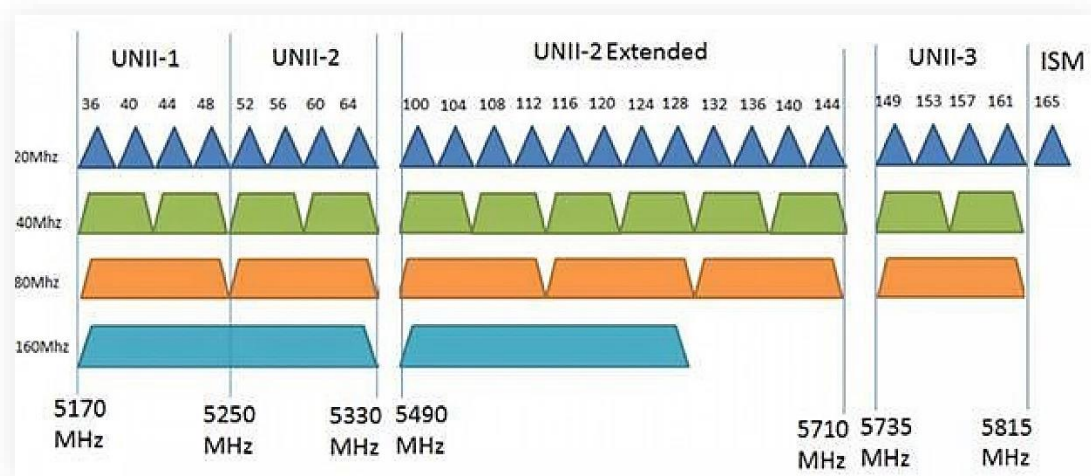


Figura 34 – 802.11 ac frecuencias [67]

Las bandas de frecuencia con posibilidad de uso dependen del país (se aplican restricciones en algunos canales usados por el gobierno) y, normalmente, hay que pagar la licencia de uso.

Una de las técnicas obligatorias en el estándar 802.11ac es el DFS (Selección de Frecuencia Dinámica) para evitar transmitir en canales donde hay radares (por ejemplo, de aviones o de la policía) [27].

DFS es requerido por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) en Estados Unidos y por la Unión Europea para garantizar que los dispositivos inalámbricos no causen interferencias en los sistemas de radar, lo que podría causar problemas de seguridad en la aviación y otros sistemas de transporte.

El protocolo se basa en la medición del nivel de señal en el canal de radio para detectar cualquier señal de radar presente. Si se detecta una señal, el dispositivo inalámbrico debe cambiar a un canal diferente que esté libre de interferencias.

La Figura 35 representa los canales en los que el DFS es obligatorio:

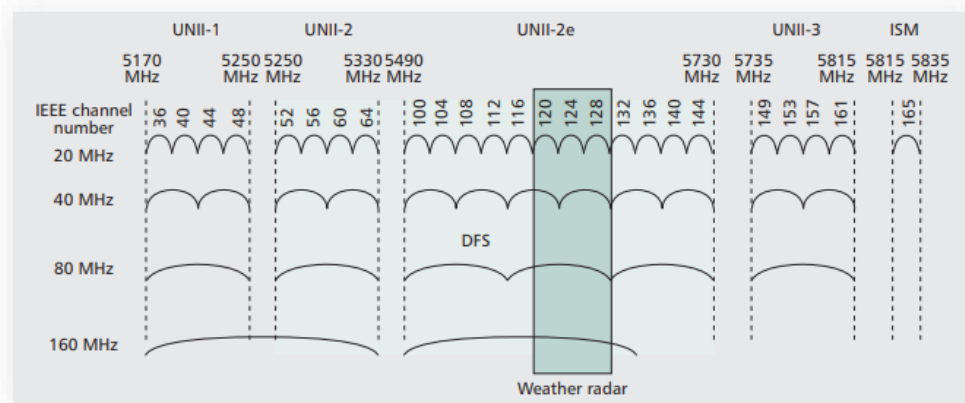


Figura 35 – DFS en 5GHz [68]

Como se observa, existen varias bandas de frecuencia [28] y [29]:

- **UNII-1:** banda de 5.17-5.25 GHz. Esta banda contiene cuatro canales de 20 MHz.
- **UNII-2:** banda de 5.25-5.30 GHz. Esta banda contiene cinco canales de 20 MHz.
- **UNII-2 extended:** banda de 5.49-5.73 GHz. Esta banda contiene once canales de 20 MHz.
- **UNII-3:** banda de 5.735-5.815 GHz. Esta banda contiene cuatro canales de 20 MHz.
- **ISM (Industrial, Scientific, and Medical):** banda de 5.815 a 5.835 GHz, 1 solo canal de 20MHz de uso libre y sin licencia, por lo que no es necesaria una autorización para su uso y que puede ser utilizada por diferentes dispositivos inalámbricos.



## 2.4. Tecnología WLC

La tecnología WLC (*Wireless LAN Controller*) tiene como principal objetivo la configuración y administración de los puntos de acceso (AP) distribuidos por la red de una manera centralizada. Con esto se consigue que todos los AP funcionen de manera centralizada en lugar de autónomos.

En una arquitectura WLC todo el tráfico fluye por el controlador de manera supervisada. Con esto se puede [27]:

- Definir redes inalámbricas: (WLANs [*Wireless Local Area Network*] – SSIDs [*Service Set Identifier*]).
- Parámetros de roaming: los valores que rigen a los clientes para ir conectándose/desconectándose de los APs visibles en el trayecto. Estos parámetros influyen en el umbral de decisión para conectarse a otro AP por considerar que es un mejor candidato.
- Controlar la autenticación: sólo los dispositivos que cuenten con el certificado correcto, y los datos de acceso, serán capaces de conectarse a la red.

Los WLC son dispositivos que trabajan con la capa 2 y 3 de la red, mediante protocolos que se encargan de controlar uno o más puntos de acceso. Los protocolos de gestión y administración más utilizados son:

- LWAPP (*Lightweight Access Point Protocol*) [31]: trabaja en la capa de enlace y fue desarrollado, por la *Wi-Fi Alliance*, para simplificar la administración de la red Wi-Fi en entornos empresariales. Se utiliza para establecer una conexión entre un controlador WLC y los puntos de acceso inalámbricos. Este protocolo también se utiliza para configurar, controlar y administrar los puntos de acceso inalámbricos de forma remota (y centralizada) desde el controlador. Finalmente indicar que es un protocolo obsoleto, por tanto, se ha sustituido por el CAPWAP.

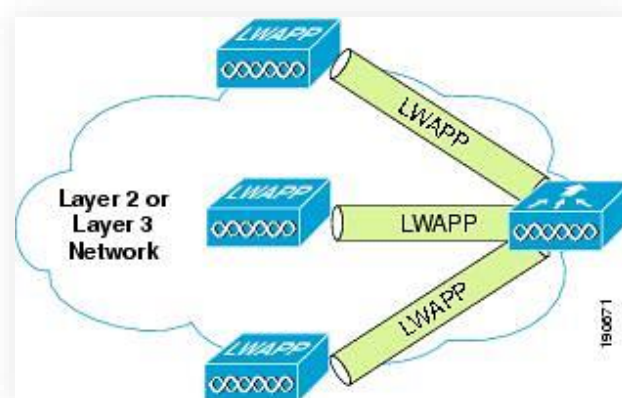


Figura 36 – WLC – LWAPP [69]

- **CAPWAP (Control and Provisioning of Wireless Access Points) [32]**: se utiliza para encapsular y transmitir tráfico de datos entre los puntos de acceso y los controladores WLC. Asimismo, permite la configuración automática de los APs, la gestión y distribución de la actualización de firmware, y proporciona un control unificado sobre la red inalámbrica. Este es el protocolo más utilizado por los WLC actuales.

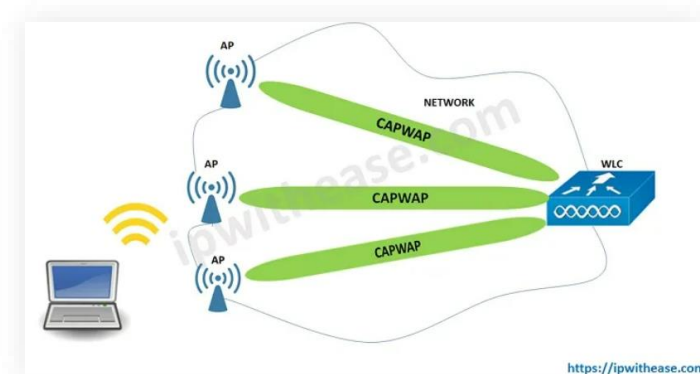


Figura 37 – WLC – CAPWAP [70]

Otros protocolos que soportan los WLC son:

- **SNMP (Simple Network Management Protocol)**: se utiliza, comúnmente, para recopilar información de los puntos de acceso inalámbricos y los controladores WLC. Por lo tanto, permite a los administradores de red obtener información en tiempo real sobre el rendimiento, la utilización y otros indicadores clave.
- **RADIUS (Remote Authentication Dial-In User Service) [33]**: es un protocolo de autenticación, utilizado en las redes inalámbricas, para proporcionar seguridad a los usuarios que se conectan a la red Wi-Fi. Los controladores WLC pueden interactuar con servidores RADIUS para proporcionar autenticación centralizada, autorización y control de los usuarios que se conectan a la red Wi-Fi. Esto mejora la seguridad de la red.

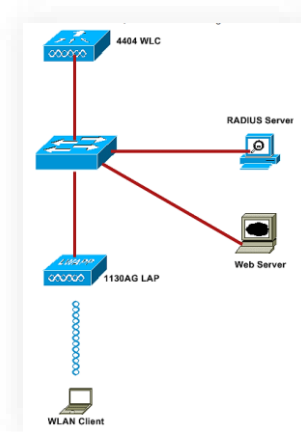


Figura 38 – WLC – RADIUS [71]

En la figura anterior (Figura 38), se observa el servidor RADIUS que se encarga de garantizar el acceso de equipo autorizados a la red (normalmente se usa un servidor adicional).

Actualmente existen varias opciones a la hora de escoger un WLC para el sistema [34]:

- **WLC físicos (hardware):** son dispositivos, físicos, instalados en un *rack* o armario de servidores. Puede soportar diferentes números de puntos de acceso (AP) dependiendo de las necesidades. Estos suelen tener capacidades de procesamiento y memoria más altas. Otra de sus características importantes: pueden administrar un mayor número de APs que los controladores virtuales (ya que poseen un *hardware* dedicado a ello).
- **WLC virtuales (software):** se ejecutan en un servidor virtualizado y se consideran una solución más económica que los controladores físicos tradicionales. Estos se pueden instalar en una máquina virtual, dentro de los servidores existentes. Por lo tanto, no se requiere la compra de hardware adicional. Además, ofrecen una escalabilidad sin límites y se pueden combinar en clústeres. Esto, les permite soportar, llegado el caso, cientos o miles de puntos de acceso.
- **WLC en la nube:** Estos controladores se ejecutan en la nube, por lo tanto, son una buena opción para organizaciones que no quieren invertir en servidores propios ni en servidores virtuales. Los WLC en la nube ofrecen una gestión centralizada de la red inalámbrica, mediante una conexión a internet, desde cualquier lugar.
- **WLC integrados en switches:** algunos fabricantes de switches tienen la capacidad de integrar el controlador WLC directamente en ellos. Esto permite que se conviertan en centros de control de red inalámbrica de alto rendimiento, administrando y controlando el acceso inalámbrico, a través de puertos de *switch* dedicados.

## 2.4.1. WLC de Hirschmann

Para este proyecto, y siguiendo con la línea de productos a utilizar, se propone el software virtual de BAT-Controller Virtual [35] :



Figura 39 – BAT-Controller Virtual (versión)

Esta versión se presenta a modo de OVA (Open Virtual Appliance, es un fichero para importar una máquina virtual preconfigurada). Una vez desplegada en la plataforma virtual se obtiene la funcionalidad de WLC. Desde esta máquina se puede administrar los puntos de acceso y proporcionar, de forma centralizada, funciones como:

- Asignación de IP a través de DHCP. Incluso filtrando por MAC para que siempre le asigne la misma IP al punto de acceso.
- Parámetros de configuración de operación de la WLAN: frecuencia, canales, parámetros de antenas, etc.

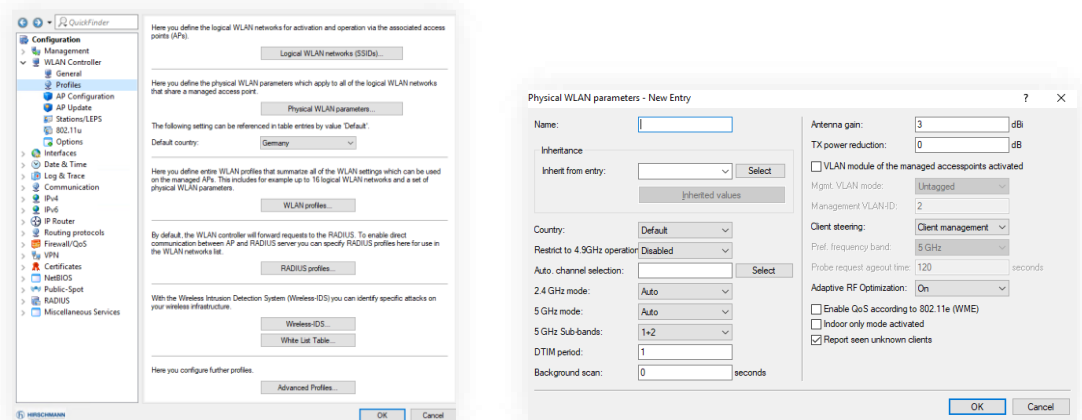


Figura 40 – Parámetros de configuración WLC – Physical WLAN

- Parámetros de autenticación a la red WiFi (SSIDs).

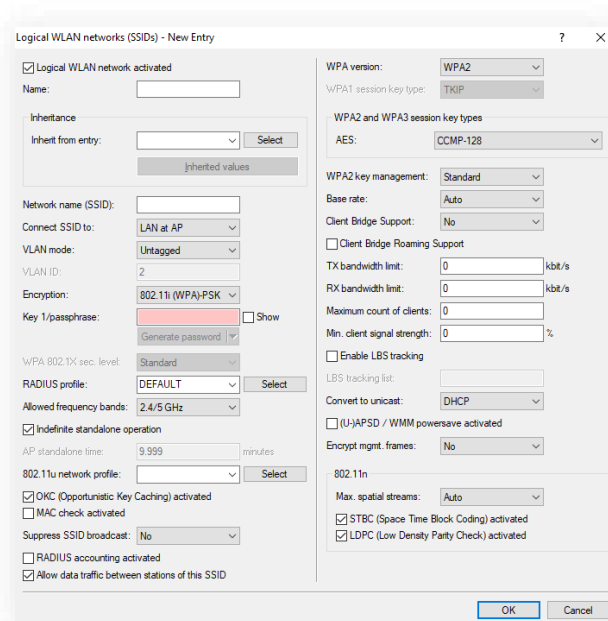


Figura 41 – Parámetros de configuración WLC – SSIDs

- Actualización y control del firmware de los equipos. Con esta funcionalidad se puede controlar que todos los puntos de acceso del sistema estén actualizados a la versión firmware que se haya establecido por proyecto.

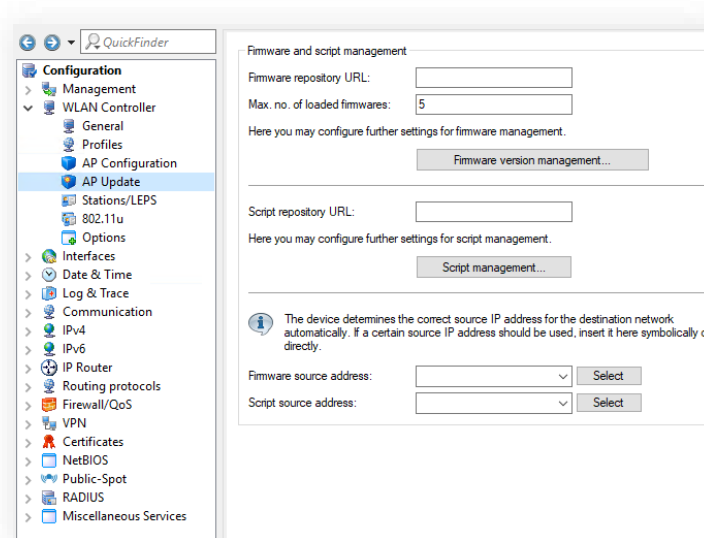


Figura 42 – Parámetros de configuración WLC – Actualizaciones

Una vez configurado y dado de alta los puntos de acceso existe la posibilidad de monitorizar su estado desde un *software* NMS. Este punto se detallará más adelante (ver apartado 2.6). En el anexo 7.1.8, se incluye la ficha técnica para más información.

## 2.5. Plataforma virtual

El mundo de las plataformas virtuales es muy potente y con gran variedad de productos software u hardware. Este apartado se centra en describir una plataforma virtual, reducida, para este proyecto. Se destacan aquellos elementos para el procesamiento, memoria y almacenamiento necesario.

Como concepto, una plataforma virtual es un conjunto de elementos *hardware* y *software* que permiten emular los procesos y aplicativos que, hace unos años, se instalaban en servidores físicos. Dicho de otra manera, se emulan a nivel *software* máquinas con diferentes sistemas operativos y/o *hardware* para que puedan ejecutarse en el mismo entorno.

En la siguiente figura se muestra, a muy alto nivel, lo que sería una plataforma virtual típica [36]:

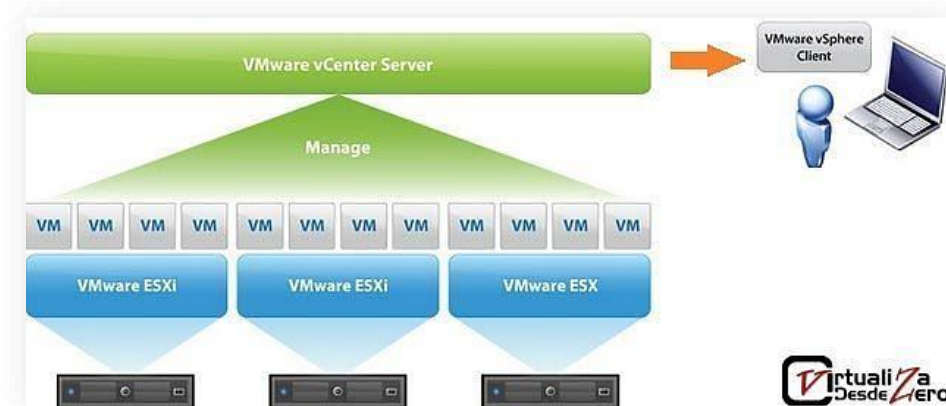


Figura 43 – Plataforma virtual ESXi [72]

Se pueden identificar elementos *hardware* (los servidores de la parte baja de la figura y el portátil de la parte derecha) y *software*:

VMWare ESXi: se le conoce como *hypervisor* y es un sistema operativo que permite que se ejecuten distintas máquinas virtuales dentro de él.

VM (Virtual Machine): son las máquinas individuales, con sistema operativo propio, donde se alojan los distintos servicios. Por ejemplo, una máquina virtual podría ejecutar un Windows 2019 Server con el software WLC que se comentaba en el apartado anterior (WLC por software).

Vmware vCenter Server: es el software que se encarga de administrar los recursos y las configuraciones tanto de los servidores físicos (CPU, memoria, almacenamiento) como de las propias máquinas virtuales y los ESXi.



- VMWare vSphere Client: es el software cliente para poder conectarnos al vCenter y poder interactuar, configurar e instalar las máquinas virtuales de la plataforma. También existe la versión *webclient* del vSphere.

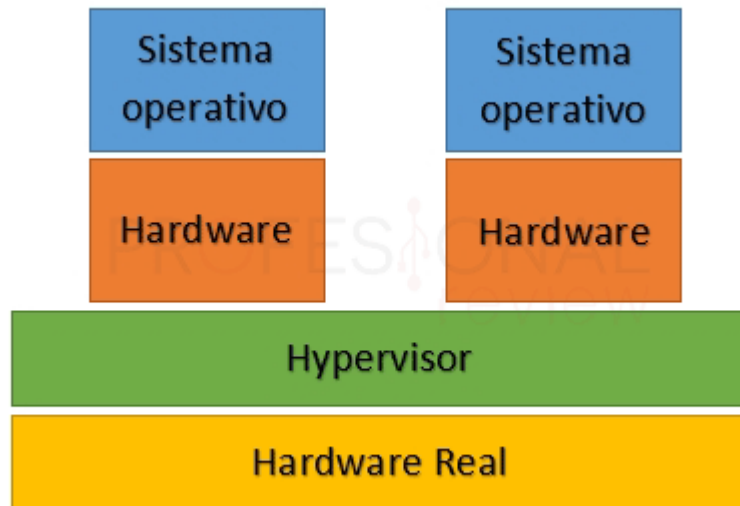


Figura 44 – Virtualización VMWare Vsphere [73]

Tal y como se muestra en la Figura 44, se puede dividir, de manera lógica, la plataforma virtual en capas:

- Hardware real: el servidor Huawei donde se instalará toda la *suite* de VMWare.
- Hypervisor: Vsphere y sus aplicaciones de configuración y administración.
- Hardware: en esta capa se configuraría el *hardware* de la máquina virtual a emular: número de procesadores virtuales, memoria *RAM*, espacio en disco duro, etc.
- Sistema Operativo: una vez definido todo lo anterior solo queda instalar el sistema operativo en la máquina que se ha configurado. Esto puede ser una instalación desde cero o una importación de una máquina que, previamente, ha sido instalada, configurada y exportada (ficheros *.ova*).

Con una plataforma virtual principalmente se reducen costes, se facilita la creación de copias de seguridad y la posibilidad de exportar/importar las máquinas virtuales ante desastres irrecuperables del sistema. Todo esto proporciona una escalabilidad y atemporalidad a través de ampliaciones de memoria y/o almacenamiento sin tener que sustituir el *hardware* de la plataforma virtual completa.

## 2.6. Servidor NMS

Un Servidor NMS (*Network Management System*) [37] se encarga de recibir a través de protocolos como SNMP e ICMP el estado e información de los equipos que conforman la red.

En el mercado existen distintos tipos de software NMS de empresas como CISCO, HUAWEI, HP, etc. Un ejemplo de estos productos es el “eSight Unified Network Management Platform” [38]:

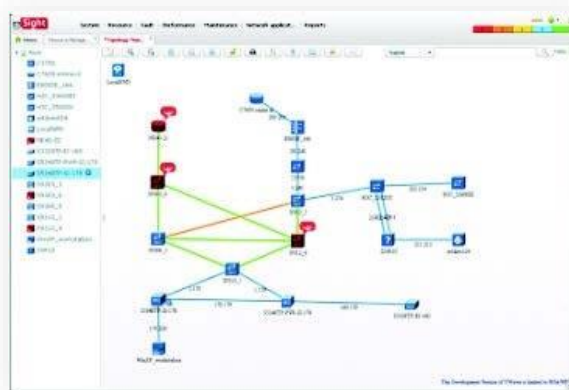


Figura 45 – Interfaz gráfica NMS [74]

Una vez configurado, y con los equipos dados de alta, se puede monitorizar el estado de los mismo. Además, se puede importar/exportar configuraciones, actualizar el firmware, etc. Este software incluye otros módulos para el análisis de tráfico de red. Esto es de bastante utilidad a la hora de hacer *troubleshooting* de problemas (por ejemplo, cuellos de botella en el tráfico).



Figura 46 – Interfaz gráfica analizador de tráfico de red [74]

En el caso de Hirschmann, existe una aplicación que hace las funciones de NMS de los puntos de acceso desplegados en el sistema. Este *software* es el “Hirschmann Industrial HiVision” [39].

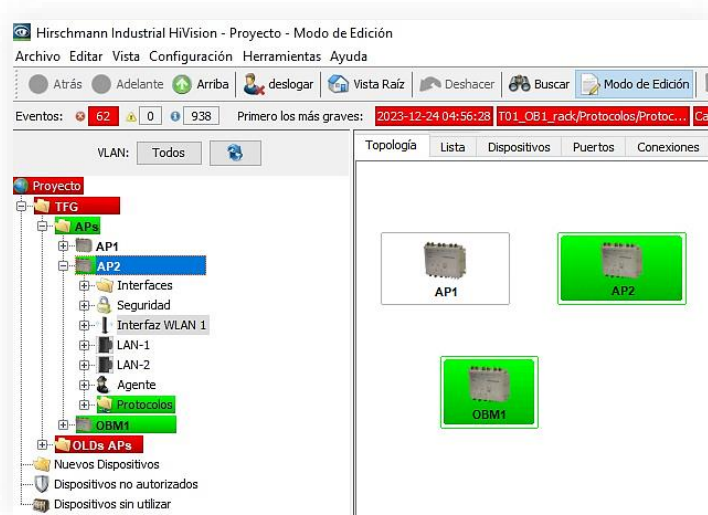


Figura 47 – Interfaz gráfica HiVision (topología)

Las principales funciones que se pueden utilizar son:

- Estado de conectividad de los equipos y errores. De una manera muy gráfica, usando colores, se consigue identificar el estado de los equipos y sus puertos.

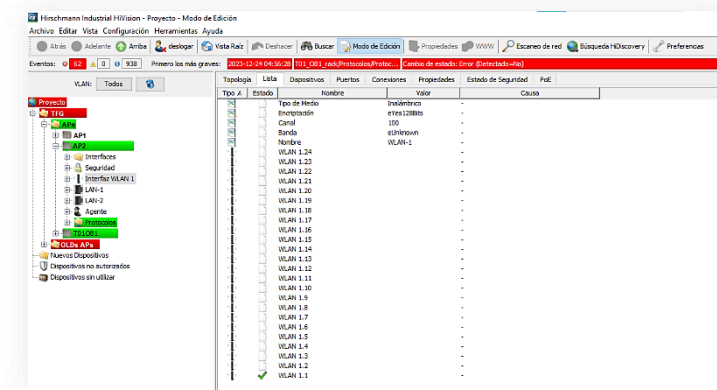


Figura 48 – Interfaz gráfica HiVision (interfaces)

- Estado general de la configuración del AP. Se puede observar datos como: temperatura, país de operación, número de serie, nombre del punto de acceso, interfaces, etc.

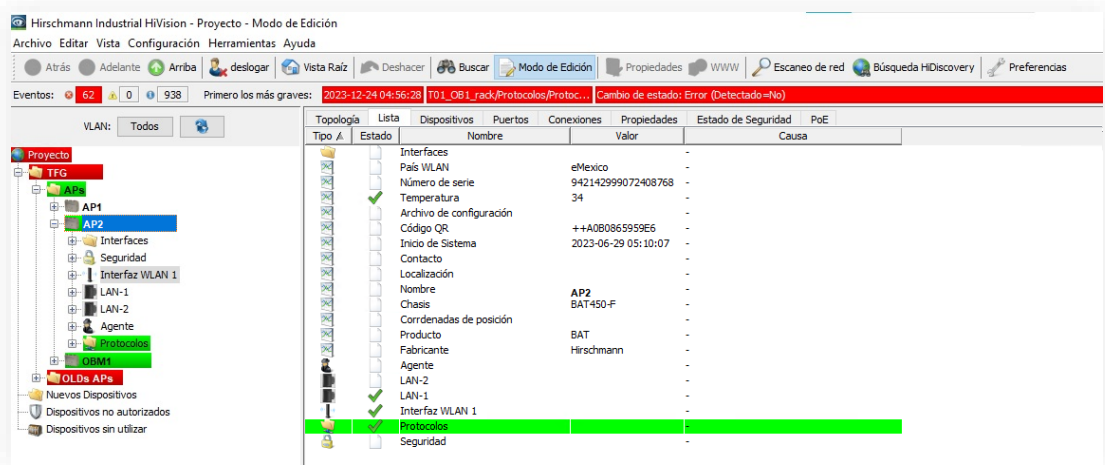


Figura 49 – Interfaz gráfica HiVision (estado del AP)

- Existen una serie de operaciones que se pueden aplicar al equipo: renombrar, filtrar eventos, interfaz web, configuración IP, etc.

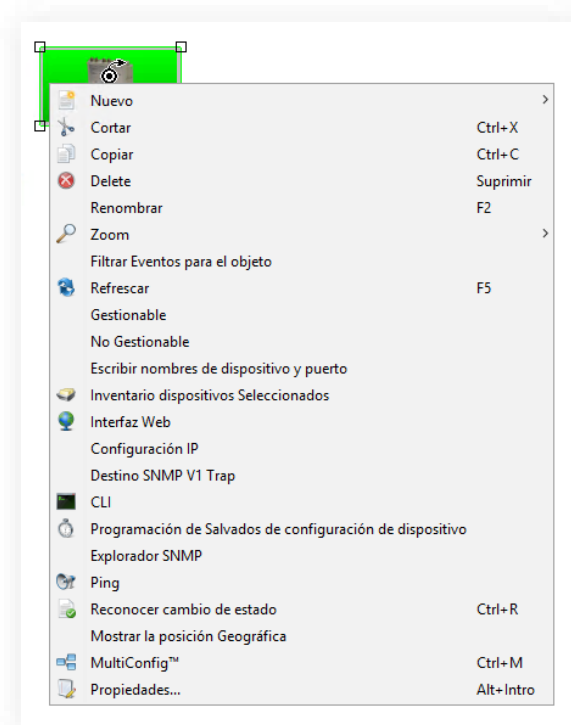


Figura 50 – Interfaz gráfica HiVision (listado de operaciones)

En resumen, es una herramienta de gran potencia para la administración y el mantenimiento del sistema. Estas funcionalidades, junto con las comentadas en el apartado 2.4.1, son las necesarias para tener un sistema administrado, mantenido y operado de manera correcta.

## 2.7. Composición del Proyecto

### 2.7.1. Requisitos y condiciones preliminares

En este proyecto, y para simular unas condiciones reales, se va a tener en cuenta que se han especificado una serie de requisitos e información para el diseño del sistema:

- En los trenes, se instalan las antenas en la parte exterior del techo, en una ubicación que no tenga obstáculos con las antenas de tierra (por ejemplo, se evitarán los equipos de aire acondicionado o pantógrafo). Concretamente a una altura de 4,2 metros por encima del rail.
- Estos trenes incluirán 3 antenas (SISO) conectadas al radio módem. Sin embargo, al colocar las 3 antenas en paralelo y, más importante, conectarlas al mismo equipo (modem embarcado) se consigue MIMO 3x3 en la transmisión.
- El diseño se deberá ajustar a la normativa vigente y definida por CNAF de México [40].
- El sistema WiFi proveerá comunicación tren-tierra con el servicio de CCTV: descarga de grabaciones en tierra.
- El protocolo para la comunicación radio será 802.11ac en banda de 5GHz.
- Velocidad de descarga será de 100Mbps a nivel aplicación (*throughput*). No se tendrán en cuenta los *roamings* entre APs (en movimiento), ya que la velocidad de transferencia se verá reducida al existir un cambio de asociación al punto de acceso.
- Cifrado de los datos mediante WPA-2.

### 2.7.2. Criterios de diseño

Entre los criterios de diseño se ha tenido en consideración lo siguiente:

- WiFi 802.11ac como tecnología seleccionada.
- Se transmitirán datos “no vitales” para la seguridad ferroviaria. Esto es, un fallo en el sistema de transmisión WiFi no afecta en el funcionamiento ni en la seguridad de los usuarios.
- Virtualización del WLC y del servidor de monitorización NMS.
- Teniendo en cuenta que las antenas embarcadas se instalarán a 4,2 metros, se establece una altura, en vía, de 5,5 metros para tener una visión sin obstáculos del techo del tren. Con esto se asegura una línea de radiación directa entre las antenas embarcadas y las de vía. Se mete un margen en la altura entre 1/1,5 metros debido a los diagramas de radiación de las antenas, como se verá en la descripción de la arquitectura.

### 2.7.3. Arquitectura lógica del sistema

La arquitectura lógica del sistema se puede dividir en tres capas: gestión y control, radio de vía y radio de tren.

- **Capa radio de tren:** son los equipos embarcados que se ubican en el tren: antenas, cableado RF y los radio módems (o clientes WiFi).
- **Capa radio de vía:** son los equipos ubicados en tierra (vía y cuartos de comunicaciones), tales como los puntos de acceso, cableado RF, antenas...
- **Capa de control y gestión:** aquí se ubica el WLC, el servidor NMS y el servidor donde se alojarán las grabaciones de video.

En la siguiente figura se observan las 3 capas lógicas de la arquitectura:

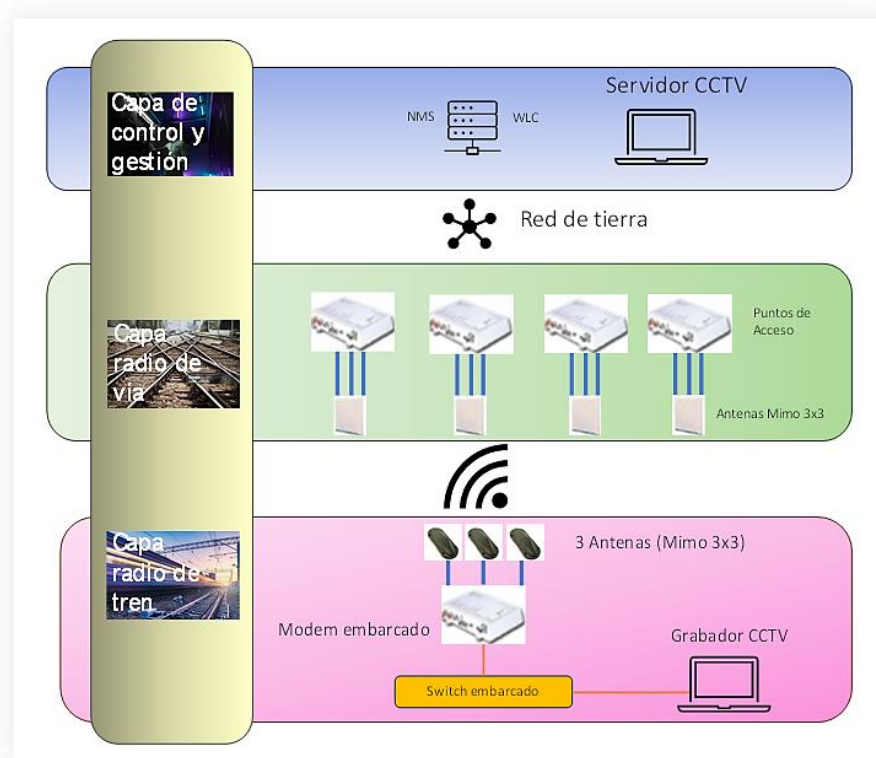


Figura 51 – Arquitectura lógica del proyecto



## 2.7.4. Plan de frecuencias

Para abordar este tema se tiene que tener en cuenta la legislación vigente en el país en el que se va a implementar el sistema. En este caso se debe investigar la normativa mexicana.

En este caso por petición del cliente, el sistema se explotará en la banda de 5GHz. Tiene la ventaja de que dispone de más canales que la banda de 2.4GHz y además, está menos saturada por lo que experimenta menores interferencias [41].

Consultando el CNAF (Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias) de México se pueden ver las bandas de uso libre que se ajustan a la normativa radioeléctrica del país. La web en la que se puede consultar toda esta información es:

<https://www.ift.org.mx/espectro-radioelectrico/cuadro-nacional-de-atribucion-de-frecuencias-cnaf>

Este organismo administrativo indica el servicio o servicios de radiocomunicaciones para cada banda de frecuencias del espectro radioeléctrico. También aporta información adicional sobre su uso. Por último, indica las bandas de frecuencias que son identificadas como “espectro libre”.

El uso de frecuencias en la banda de espectro libre es ideal para reducir el coste económico porque no es necesaria adquirir el espectro para su uso.

Consultando la web anteriormente comentada se observa que la asignación de frecuencias ha sido revisada varias veces a lo largo de los años, concretamente 2017, 2018 y siendo la más reciente la del 30 de diciembre de 2021:

» Sitio Web del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF)
» Acuerdo mediante el cual el Pleno del IFT aprueba el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias <a href="#">🔗</a>
» Acuerdo mediante el cual el Pleno del IFT Modifica el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias <a href="#">🔗</a>
» Versión Integral del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias, publicado en el <b>DOF el 3 de marzo de 2017</b>
» Acuerdo mediante el cual el Pleno del IFT Actualiza el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias
» Versión Integral del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias, publicado en el <b>DOF el 1 de octubre de 2018</b>
» Acuerdo mediante el cual el Pleno del IFT actualiza el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias 2021.
» Versión Integral del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias, publicado en el <b>DOF el 30 de diciembre de 2021</b>

Figura 52 – Histórico de versiones sobre la atribución de licencias del CNAF

Revisando el documento se puede encontrar que las bandas de espectro libre son las indicadas en el párrafo **MX159**:

**MX159** El 13 de marzo de 2006 se publicó en el DOF el Acuerdo por el que se clasifican como espectro libre las bandas de frecuencias que se enlistan a continuación:

844	DIARIO OFICIAL	Jueves 30 de diciembre de 2021
902 - 928 MHz	5.15 - 5.25 GHz	5.725 - 5.85 GHz
2400 - 2483.5 MHz	5.25 - 5.35 GHz	

Figura 53 – MX159 – Bandas de espectro libre definidas por CNAF

Centrándose ya en la banda de 5GHz se encuentra lo indicado en el párrafo **MX227** y **MX229**:

**MX227** El 27 de noviembre del 2012 se publicó en el DOF el Acuerdo por el que se establecen como espectro libre las bandas de frecuencias de 5.47 - 5.6 GHz y 5.65 - 5.725 GHz. Las características técnico-operativas respectivas se estipulan en el mismo documento.

Figura 54 – MX227 – Bandas de espectro libre 5GHz definidas por CNAF

**MX229** El 14 de abril de 2006 se publicó en el DOF la Resolución de la extinta Comisión Federal de Telecomunicaciones, por la que se expiden las condiciones técnicas de operación de la banda 5.725 - 5.85 GHz para su utilización como espectro libre.

Figura 55 – MX229 – Bandas de espectro libre 5GHz por CNAF (parte 2)

Por otro lado, si se consulta la información publicada por IFETEL (Instituto Federal de Telecomunicaciones) en el apartado de normatividad:

<https://www.ift.org.mx/espectro-radioelectrico/normatividad>

#### Bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico de uso libre

- Acuerdo mediante el cual el Pleno del Instituto Federal de Telecomunicaciones clasifica la Banda de Frecuencias de 57-64 GHz como Espectro Libre y expide las Condiciones Técnicas de Operación [🔗](#)
- Acuerdo mediante el cual el Pleno del Instituto Federal de Telecomunicaciones establece las nuevas condiciones técnicas de operación de la banda de frecuencias 2400-2483.5 MHz, clasificada como espectro libre [🔗](#)
- Acuerdo mediante el cual el Pleno del Instituto clasifica la banda 5925-6425 MHz como espectro libre [🔗](#)
- Inventario de bandas de frecuencias clasificadas como espectro libre – marzo 2023 [🔗](#)

Figura 56 – Inventario de bandas de frecuencias de espectro libre por IFETEL

Se puede encontrar la misma información, pero con la ventaja de que la última fecha de actualización es de marzo de 2023.

Como conclusión a la consulta de información, y revisión del documento “*Inventario de bandas de frecuencias clasificadas como espectro libre – marzo 2023*”, se observa una clasificación más clara de los acuerdos y resoluciones respecto a las frecuencias de uso libre que se aplicarán en la configuración de los puntos de acceso que se utilizarán durante la definición de la arquitectura de este proyecto.

A continuación, se muestra una tabla resumen en la que se señalan las bandas de frecuencia de uso libre a considerar:

Tabla 7 – Resumen de bandas de frecuencia de espectro libre en 5GHz

Nº	Banda de frecuencia	Normativas aplicadas	
1	5.15 GHz – 5.25 GHz	MX159	Acuerdo SCT 130306, DOF 13/03/2006
2	5.25 GHz – 5.35 GHz	MX227	Acuerdo SCT 271112, DOF 27/11/2012
3	5.47 GHz – 5.6 GHz		
4	5.65 GHz – 5.725 GHz	MX159 y	Resolución P/EXT/150306/8, DOF 14/04/2006
5	5.725 GHz – 5.85 GHz	MX229	

Se observan 5 posibles bandas en las que emitir sin necesidad de adquirir una licencia, pero si se observa más detenidamente se pueden ir desechando algunas de ellas:

- La banda 1 y 2 solo se permite su uso en interiores por lo que como el sistema se va a implantar en talleres, cocheras y vías ferroviarias estas bandas quedan descartadas.
- Por otro lado, las bandas 3, 4 y 5 sí tienen el uso permitido en vías ferroviarias para el exterior. Por lo tanto, se debe hacer un estudio de cuál es la mejor opción. Considerando el número de canales disponibles se tienen los siguientes datos [42]:
  - **Banda 3 [5.47 GHz a 5.6 GHz]:**
    - 6 canales con un ancho de banda de 20MHz (96,100,104,108,112,116)
    - 2 canales con un ancho de banda de 40 MHz (102,110)
    - 1 canal con un ancho de banda de 80 MHz (106)
  - **Banda 4 [5.65 GHz a 5.725 GHz]:**
    - 3 canales con un ancho de banda de 20MHz (132,136,140)
    - 1 canal con un ancho de banda de 40 MHz (134)
  - **Banda 5 [5.725 GHz a 5.825 GHz]:**
    - 4 canales con un ancho de banda de 20MHz (149,153,157,161)
    - 2 canales con un ancho de banda de 40 MHz (151,159)
    - 1 canal con un ancho de banda de 80 MHz (155)

Teniendo en cuenta las necesidades de *throughput* del proyecto se necesita configurar canales de al menos 40MHz (gracias a la agregación de canales adyacentes de 20MHz). Por otro lado, en la zona pueden existir otras redes WiFi de otros subsistemas que deben coexistir (por ejemplo, red WiFi corporativa).

Como conclusión se seleccionan canales de las bandas más bajas (3 y 4) y queda libre la banda 5 para su uso en otros subsistemas.

Por tanto, y con todo lo expuesto anteriormente, los canales seleccionados de 40 MHz son: **102, 110 y 134**. Esto indica que la banda de operación del sistema WiFi será 5490-5690MHz.

Ch. 20 MHz	F <sub>0</sub> (MHz)	Frequency range (MHz)	F <sub>0</sub> index		
			40 MHz	80 MHz	160 MHz
100	5500	5490–5510	102	106	114
104	5520	5510–5530			
108	5540	5530–5550			
112	5560	5550–5570	110		
116	5580	5570–5590	118		
120	5600	5590–5610	122		
124	5620	5610–5630			
128	5640	5630–5650			
132	5660	5650–5670	134		
136	5680	5670–5690			

Figura 57 – Canales WiFi de 40MHz seleccionados [75]

Por último, y para concluir este apartado, se expone una tabla con los 3 canales a utilizar y que servirán para referirse a ellos durante el resto de del documento:

Tabla 8 – Canales y frecuencias a usar en el sistema WiFi

Nº	Canal	Canales Agregados	Frecuencia Central	Ancho de Banda	Banda	DFS
F1	102	100, 104	5510 MHz	40 MHz	5490-5530 MHz	Activado
F2	110	108, 112	5550 MHz	40 MHz	5330-5570 MHz	Activado
F3	134	132, 136	5670 MHz	40 MHz	5650-5690 MHz	Activado

Tal y como se indica en el documento publicado por el CNAF, es obligatorio la activación del DFS en las bandas de frecuencia escogidas (3 y 4). Por lo tanto, si se detecta una señal de radar en el mismo canal, la frecuencia final de operación de los puntos de acceso se podría ver alterada.

## 2.7.5. Arquitectura del sistema

En este apartado se procede a definir la arquitectura del sistema propuesto en este proyecto. En el apartado **2.7.3** se ha definido la arquitectura lógica. A continuación, se explicará qué elementos componen la arquitectura física del sistema y su despliegue en campo.

### 2.7.5.1. Arquitectura física en vía

Desde el punto de vista de campo, tanto en depósito como en vía comercial, se van a desplegar varios puntos de acceso WiFi. Esto se aplicará tal y como se muestra en la Figura 58:

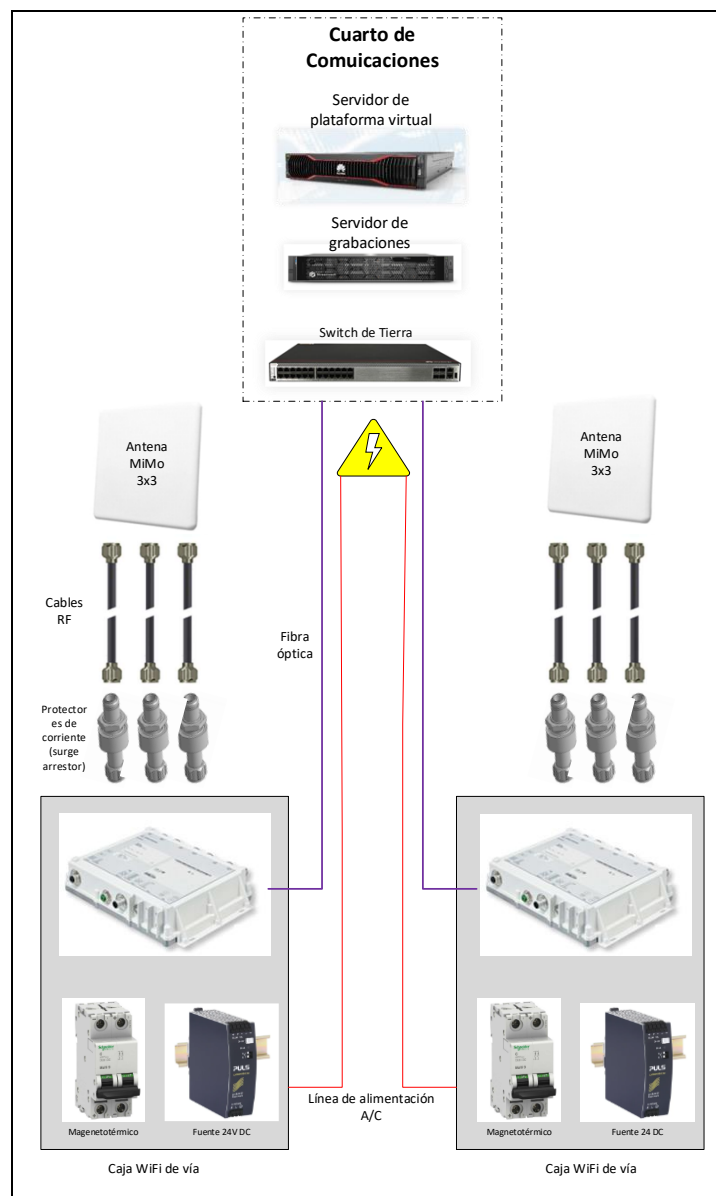


Figura 58 – Arquitectura física – vía

Los elementos de los que se compone la arquitectura de vía son (para más detalle sobre los elementos consultar el apartado **2.7.6**):

- Caja estanca para proteger los equipos de vía. En el interior de ella se instalará:
  - Un punto de acceso WiFi 802.11ac.
  - Una fuente de alimentación para los equipos (24DC).
  - Un magnetotérmico para proteger de sobretensiones el equipo.
  - Conversor de medios: la conexión con el switch del centro de control se consigue mediante fibra óptica. Como el punto de acceso tiene una interfaz ethernet, se debe realizar una conversión fibra/RJ45.
  - Cables necesarios:
    - ✓ Cables de corriente eléctrica desde el centro de control para alimentar la fuente de la caja.
    - ✓ Cable de fibra óptica para cubrir distancias mayores a 100 metros (que es el límite de los cables ethernet y, por lo tanto, no se puede utilizar en vía). La idea es que se llega a la caja con fibra óptica y, a través del conversor de medios, se convierte a ethernet para el AP.
- En cada puerto del AP (el equipo tiene tres puertos) se conectará un protector de radioeléctrico o *surge arrestor*. Este dispositivo funciona a modo de pararrayos, es decir, en caso de que un rayo golpee las antenas este dispositivo evita que la tensión estropee el punto de acceso (evitando un sobre coste al tener que sustituir solo el protector y la antena-cables).
- Tres cables RF *feeder* para conectar los protectores y los 3 conectores de la antena MIMO 3x3.
- Una antena MIMO 3x3 conectada a cada punto de acceso.
- Switch en el centro de comunicaciones para proporcionar la red del sistema.
- Servidor de plataforma virtual: se instalarán las máquinas virtuales para el WLC, aplicaciones del sistema, etc.
- Servidor de grabaciones: contiene el software del producto Streamvault de Genetec para la descarga de grabaciones. Además, cuenta con capacidad suficiente para almacenar las grabaciones del tren descargadas.



## 2.7.5.2. Arquitectura física en tren (embarcada)

En el tren se instalarán los siguientes equipos para implementar el sistema WiFi sobre el embarcado existente (Figura 59):



Figura 59 – Arquitectura física – tren (embarcada)

A continuación, se enumera y se describe, brevemente, los elementos de los que consta la arquitectura (para más información consultar el apartado **2.7.6**):

- Un módem embarcado a modo de cliente WiFi 802.11ac.
- Tres cables RF *feeder* para conectar cada puerto RF del módem a las antenas.
- Tres antenas SISO (tipo *shark*) que conectadas simultáneamente al cliente (módem) permiten la funcionalidad MiMO 3x3 en la transmisión.
- Los elementos marcados en amarillo están excluidos del alcance del proyecto, aunque se definen los requisitos mínimos recomendados:
  - El *switch* embarcado debe ser Hi-PoE/PoE+ (*High Power Over Ethernet*) para alimentar el módem a través del cable ethernet.
  - El grabador debe ser compatible con Genetec. Para ello la aplicación implementa un protocolo propietario llamado "Genetec Protocol". Con este protocolo el sistema puede conectar con cualquier grabador.
  - Las cámaras deben ser de alta resolución (1080p) y 2 megapíxeles de calidad como mínimo.

## 2.7.6. Elementos hardware

A continuación, se describen todos los elementos hardware que forman parte de este proyecto.

### 2.7.6.1. Elementos Centro de Control

#### 2.7.6.1.1. Servidor central de plataforma virtual

Para el núcleo de la plataforma virtual, se ha escogido un equipo de la marca Huawei porque es más económico que los de la marca DELL. Dadas las características del proyecto, este equipo tiene unas especificaciones técnicas suficiente, incluso si se propusiera una ampliación de alcance.

El modelo seleccionado es el Atlas 800 (modelo 300):



*Figura 60 – Host plataforma virtual – Atlas 800*

Las principales especificaciones técnicas de este equipo son:

- Espacio de ocupación en armario rack: 2U.
- Procesador 2 Kunpeng:
  - 64 núcleos de CPU.
  - Soporta hasta 8 canales de memoria DDR4 a 3200MHz.
  - Frecuencias de reloj hasta 2.6 GHz.
- Disco duro SATA de 480GB de capacidad.
- Discos duros SSD de 960GB de capacidad.
- RAID compatibles: 0, 1, 10, 5, 50, 6 o 60.
- Tarjetas de red Gigabit Ethernet.

Para más información, consultar el anexo del apartado **7.1.15**.

## 2.7.6.1.2. Servidor para almacenar grabaciones de los trenes

Para el almacenamiento de las grabaciones descargadas desde el tren, se ha escogido el *hardware* propietario que Genetec recomienda para ser usado con su *suite software* de seguridad.

El modelo es el Streamvault de 168TB de capacidad (SV-2020E-R18-168T-12-216):

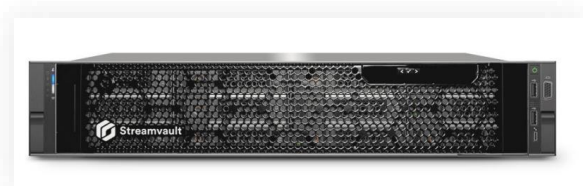


Figura 61 – Streamvault de Genetec

Entre sus principales características técnicas se encuentran:

- Procesador Intel Xenon y 16 GB de RAM.
- Capacidad de procesamiento de hasta 670 Mbps totales de *throughput*.
- Disco duro para sistema operativo: 2x240GB (SSD)
- Capacidad de almacenamiento: 168 TB, en 14 discos de 12TB (NLSAS).

Para más información, consultar el anexo del apartado 7.1.14.

## 2.7.6.1.3. Switch de comunicaciones

Para gestionar las comunicaciones entre APs y equipos de centro de control se propone un modelo de la marca Huawei. Concretamente, el modelo S5731-S24P4X. Este switch gestionará las comunicaciones del sistema WiFi y podrá conectarse a otras redes si fuera necesario:



Figura 62 – Switch S5731 de Huawei

Entre sus principales características se encuentran:

- 24 puertos 10/100/1000Base-T y 4 puertos para fibra óptica (SFP+).
- 2 fuentes de alimentación.
- Capacidad de alimentación de equipos POE+.
- Capacidad de *switching* 128Gbps/672Gbps.

Para más información, consultar el anexo del apartado 7.1.15.

### 2.7.6.1.4. Armario tipo rack

Todos los equipos mencionados en apartados anteriores se instalarán juntos en un armario tipo rack. Este armario se puede alojar en el cuarto de comunicaciones que haya habilitado para tal uso.

El modelo seleccionado es el WL202 de la marca Rackmatic:



*Figura 63 – Armario tipo rack*

Entre las principales características de este armario se encuentran:

- Armario de 19”.
- Capacidad de instalación de equipos hasta 29U.
- Medidas: 600x800x1400mm.
- Incluye ventilación.

Para más información, consultar el anexo del apartado **7.1.11**.

## 2.7.6.2. Elementos Vía

### 2.7.6.2.1. Caja de vía

Para proteger los equipos que se van a instalar en vía, se debe proveer una caja con una protección mínima IP65. Esto es debido a que, aunque los puntos de acceso están diseñados para exterior, el resto de los elementos a utilizar no. Este es el motivo por el que se decide incluir todos los elementos en una caja.

Se propone una caja de pared RS PRO de Acero RAL 7032 con placa de montaje. Unas medidas 500 x 400 x 200mm (para incluir los 3 equipos y resto de pequeños componentes) y con una protección IP66 para exteriores:



*Figura 64 – Caja de vía*

Aunque es el modelo propuesto en el proyecto, llegado el momento, se puede instalar otra caja de características similares. Para más información se ha incluido el *datasheet* en el anexo del apartado **7.1.9**.

### 2.7.6.2.2. Punto de acceso WiFi

Para este proyecto se ha escogido el producto BAT450-FMX599AN9K9AT6T7N99DZH de la marca Hirschmann y distribuido por la empresa BELDEN Inc.



Figura 65 – Punto de Acceso BAT450-F

Es compatible con el estándar 802.11ac y entre las especificaciones técnicas se pueden destacar las siguientes (para más detalle ver el *datasheet* o ficha de datos que se ha incluido en el apartado 7.1.1:

Tabla 9 – BAT450-F Especificaciones Técnicas

Parámetro	Descripción
Protocolo Radio	IEEE 802.11a/b/g/n/ac WLAN interfaz IEEE 802.11ac hasta 1300 Mbit/s
Certificación país	Perfil para país México.
Conector de antena	3 x conector N para cada módulo WLAN.
Banda de frecuencia	WLAN soporta 2.4 GHz y 5 GHz: 2412 -2472 MHz y 5180 - 5825 MHz (restricciones según país)
Modulación	Nota: La numeración MCS cambia con 11ac. Soporta <i>data rates</i> : MCS0-MCS9. Ancho de canales: 20MHz, 40MHz y 80MHz
Sensibilidad del receptor	-95 dBm
Características radio adicionales	3x3 MIMO. El equipo soporta hasta 3 streams (configurable).
Clase de Protección	IP65 / IP67

Este punto de acceso es el componente principal en este proyecto. Se contempla la zona geográfica de México en su *firmware*, es decir, tiene en consideración toda la legislación y normativa vigente y aplicable a esa zona del mundo en lo referente a radiofrecuencia.

Es un punto de acceso específicamente diseñado para entornos ferroviarios:

- Está protegido por una carcasa metálica con protección IP65/IP67:
  - IP65: (*International protection*), equipo hermético al polvo y protegido contra el agua proyectada.
  - IP67: Equipo hermético al polvo y protegido contra la inmersión durante 30 minutos a profundidades 150 mm - 1000 mm.
- Temperatura de operación con rango extendido: desde -40°C hasta 70°C.
- Humedad relativa: 10 % ... 95 %
- Alimentación configurable: PoE / 24V DC / 110 V DC



Por último, en las siguientes figuras, Figura 66 y Figura 67, se muestra un detalle de las puertos y conexiones del equipo.



Figura 66 – Detalle de puerto de consola, eth2, eth1 y alimentación



Figura 67 – Detalle de los puertos RF (ant1, ant2 y ant3)

### 2.7.6.2.3. Fuente de alimentación 24V DC

Para alimentar los puntos de acceso y conversores de medio, que contienen las cajas de vía, se va a utilizar una fuente de 24 voltios DC (corriente continua) de la marca PULSE.

Este modelo se caracteriza por las siguientes especificaciones técnicas:

- 24 voltios, 3 amperios y 80 vatios de potencia. El consumo del AP son 10W y del convertor de medios 4W (total 14W) por lo que se obtiene una potencia mayor para futuras ampliaciones o necesidades.
- Se puede fijar a la caja con un carril DIN3.



Figura 68 – Fuente de alimentación PULSE 24V DC

Para más información consultar el *datasheet* adjunto en el anexo **7.1.5**.

## 2.7.6.2.4. Conversor de medios

Puesto que a la caja llega el cable de fibra óptica, y en el punto de acceso los conectores son de tipo *ethernet* M12-X, se debe utilizar un conversor de medios.

El modelo seleccionado es el SPIDER PL 40 de Hirschmann:



Figura 69 – Conversor de medios – SPIDER PL 40

Sus principales características son:

- Alimentación de 24V DC.
- Consumo de 4W.
- Un puerto ethernet de 10/100/1000BASE-T.
- Un puerto SFP para fibra óptica.

Para más información consultar el *datasheet* adjunto en el anexo 7.1.6.

## 2.7.6.2.5. Descargador/Surge arrestor

Para proteger el punto de acceso de estados de sobretensión transitorios, producidos por la caída de un rayo sobre la antena o poste donde está instalada la caja, se colocará un elemento pasivo a modo de pararrayos.

El elemento elegido es el EMP Protector de HUBER+SUHNER (3400.17.0428):

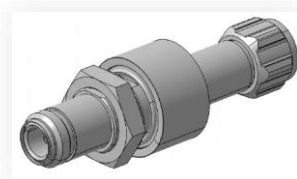


Figura 70 – Descargador/Surge Arrestor

Sus principales características son:

Tabla 10 – EMP Protector - Especificaciones Técnicas

Parámetro	Valor
Puertos	1 puerto N macho (no protegido) – 1 puerto N hembra (protegido)
Impedancia	50 Ohms
Rango de frecuencia	2000-6000MHz
Pérdida por retorno	≥ 20 dB
Pérdida por inserción	≤ 0.2 dB
Capacidad de aguante de sobre corriente	50kA múltiples

Para más información consultar el *datasheet* adjunto en el anexo 7.1.7.

## 2.7.6.2.6. Antenas de vía

Las antenas situadas en la vía se instalarán en pared o en un soporte de vía (catenaria o mástil dedicado dependiente del enclave). Cada punto de acceso tendrá una antena configurada como MIMO 3x3.

La antena seleccionada para este proyecto es el modelo SENCITY® Spot-L MIMO 3x3 (ref. 1356.17.0090) del fabricante Huber&Shuner.



Figura 71 – Antena de vía

Esta antena es un modelo plano, direccional, triple *slant* o *inclinación* MIMO 3x3. Entre sus principales características se encuentran las siguientes (para más información consultar el *datasheet*, o ficha de datos, que ha sido incluida en el apartado 7.1.2):

Tabla 11 – Antena de vía - Especificaciones Técnicas

Parámetro	Valor
Banda de frecuencia	Desde 4.9GHz a 6.1GHz
Diseño exterior	Plástico y aluminio
Ganancia (Banda 5150MHz-6000Mhz)	16dBi
Polarización	Vertical y +/- 45°

Apertura del haz, horizontal a 3dB (Banda 5150-6000MHz)	20°
Apertura del haz, vertical a 3dB (Banda 5150-6000MHz)	20°
VSWR (Banda 5150-6000MHz)	1.8
Impedancia nominal (Banda 5150-6000MHz)	50 ohmios
Conector	Tipo N-Hembra
Dimensiones	305*305*15 (alto*ancho*profundidad)
Peso	1.5 Kg
Carga Frontal por viento	263 N a 160 km/h
Carga Lateral por viento	13 N a 160 km/h
Temperatura de operación	desde -45°C a 70°C
Protección (Clase)	IP67

Los diagramas de radiación (horizontal y vertical) de este modelo de antena en la frecuencia 5725MHz son:

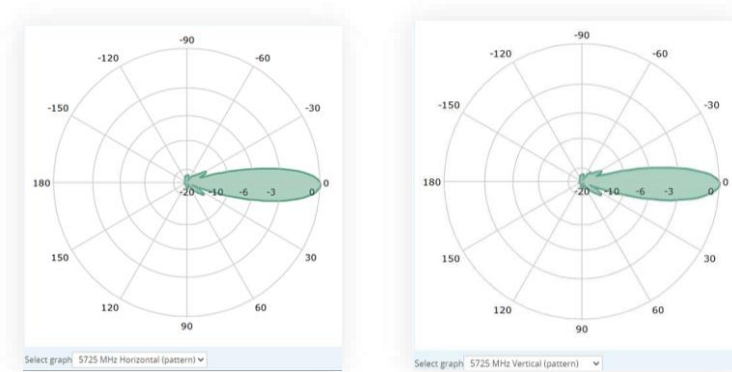


Figura 72 – Plano de radiación antena (H y V a 5725MHz)

Es una antena direccional ya que, en el entorno donde se instala, existe un movimiento en línea recta por parte del tren y se tiene una cobertura con línea de vista (sin obstáculos). Al instalar una antena direccional se consigue concentrar la potencia de la antena en el punto deseado, en este caso el techo de la unidad (ver plano de radiación en la Figura 72). Por esto, la optimización de la cobertura WiFi recae en el personal encargado de la instalación en campo. Además, se debe lograr la mejor orientación de las antenas dependiendo del entorno. Estas antenas tienen diferentes montajes que permiten orientar correctamente el lóbulo frontal y poder adaptarse al distinto trazado de la solución (por ejemplo, una curva en vía).



Figura 73 – Soporte orientable para antena (Ref. 9091.99.0183)

### 2.7.6.2.7. Cable coaxial (RF feeder)

Para la elección del cable coaxial se han tenido en cuenta los valores de atenuación para la longitud del cable. Las antenas se van a instalar en vía o en el techo del tren, por tanto, la longitud mínima del cable, teniendo en cuenta recorrido y máximo ángulo de torsión del cable, ha sido establecida en 5 metros.

Uno de los cables más utilizados en el sector ferroviario, para este tipo de instalaciones, es el SPUMA\_400\_FR\_01. Fabricado por la empresa Huber+Suhner y con conectores tipo N-Macho en ambos extremos.



Figura 74 – Cable coaxial RF Feeder SPUMA-400

Para resumir sus principales características, se ha desarrollado la siguiente tabla para una frecuencia de 5.7GHz (frecuencia más alta, ver apartado 2.7.4):

Tabla 12 – SPUMA400 - Especificaciones Técnicas

Parámetro	Valor
Frecuencia de operación	6GHz
Impedancia	50 Ohms
Atenuación (6GHz)	<0.35 dB/m
Diámetro del conductor exterior con cubierta	10,25 +/- 0.1 mm
Radio de curvatura estática mínima	<25 mm
Radio de curvatura dinámica mínima	<100 mm
Velocidad de la señal	85%
Capacitancia	78 pF/m
Test de resistencia UV	ISO 4892-2A
Rango de temperatura	Desde -40°C a 85°C
Peso	11,5 Kg/100m

### 2.7.6.2.8. Cable coaxial (RF jumper)

También se ha definido, para el proyecto, este tipo de cable RF diseñado para distancias cortas. Se debe usar en distancias cortas porque el diámetro del cable es más pequeño y la atenuación es más alta que en el caso del RF Feeder.

El cable seleccionado es el RADOX\_RF\_400. También fabricado por Huber+Suhner y con dos conectores tipo N-Macho en ambos extremos.



Figura 75 – Cable coaxial RF Jumper RADOX\_RF\_400

En la tabla mostrada a continuación, se pueden observar sus principales características para la frecuencia 5.7GHz:

Tabla 13 – RADOX - Especificaciones Técnicas

Parámetro	Valor
Frecuencia de operación	6GHz
Impedancia	50 Ohms
Atenuación (6GHz)	1.77 dB/m
Diámetro del conductor exterior con cubierta	5,34 +/- 0.1 mm
Radio de curvatura estática mínima	<30 mm
Radio de curvatura dinámica mínima	<60 mm (50 flexiones máximas)
Velocidad de la señal	70,3%
Capacitancia	94,5 pF/m
Rango de temperatura	Desde -40°C a 105°C
Peso	5,6 Kg/100m

Como se puede observar, el nivel de atenuación por cada metro es de 1.77 dB. Un valor bastante más alto que en el caso del RF *Feeder*, que es de 0.35 dB cada metro. Este es el principal motivo por el que este cable está indicado para distancia cortas y en las que sea necesaria más flexibilidad.

### 2.7.6.3. Elementos embarcados (tren)

#### 2.7.6.3.1. Radio Módem (cliente)

El hardware escogido para el equipo que actuará como cliente (módem) es el mismo que se ha visto en el apartado **2.7.6.1**. Este equipo será configurado como cliente en lugar de como punto de acceso.



## 2.7.6.3.2. Antenas embarcadas

Para las antenas instaladas en el tren, se ha seleccionado una antena tipo *shark*. Esta antena suele ser la más común en entornos ferroviarios. Se deberán instalar en la parte exterior del techo del tren. El número de antenas por cabina será de tres para poder aprovechar la característica MIMO 3x3 de los puntos de acceso en vía.

El modelo a utilizar es el SENCITY RAIL EXCEL (ref. 1356.17.0010) del fabricante Huber+Sunher.



Figura 76 – Antena embarcada SENCITY RAIL EXCEL

Es una antena direccional con forma de aleta de tiburón (de ahí su nombre “shark”). Las principales características están destacadas en la siguiente Tabla 14:

Tabla 14 – SENCITY RAIL EXCEL - Especificaciones Técnicas

Parámetro	Valor
Frecuencia de operación	4.9GHz a 5.975GHz
Impedancia	50 Ohms
Ganancia	12 dBi
Polarización	Vertical
VSWR	1.6
Conector	N-Hembra
Diseño para exterior	EN50155 (estándar ferroviario) EN45545-2 y NFPA-130 (retardante de incendio)
Dimensiones	90 * 100 * 260 (Alto * Ancho * Profundidad)
Peso	1.4 Kg

Para más información consultar el anexo con el **datasheet** o ficha de datos del apartado **7.1.3**.

En la Figura 77, se muestran los diagramas de radiación para la frecuencia seleccionada en el proyecto (tomando como peor caso la frecuencia más alta 5.725 GHz):

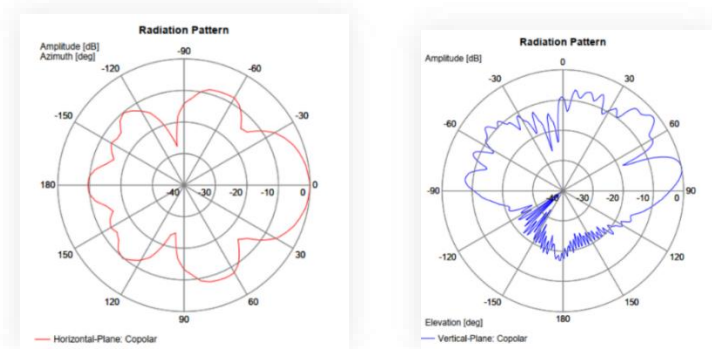


Figura 77 – Antena embarcada SENCITY RAIL EXCEL diagrama de radiación V y H

Como se puede observar, al ser una antena direccional, el mayor alcance del lóbulo de cobertura se encuentra en la parte central pero un poco elevado hacia arriba. Esta antena va a ser utilizada junto con las de vía (triple *slant* +/-45°) por tanto, se instalarán con un soporte que permita esta inclinación.

A continuación, se muestra la Figura 78, que contiene un esquema orientativo de cómo debe ser la instalación de las antenas en una cabina de tren. En ella se observa como las antenas de los extremos están inclinadas 45° y la central sin inclinación, lóbulo frontal apuntando a las vías:

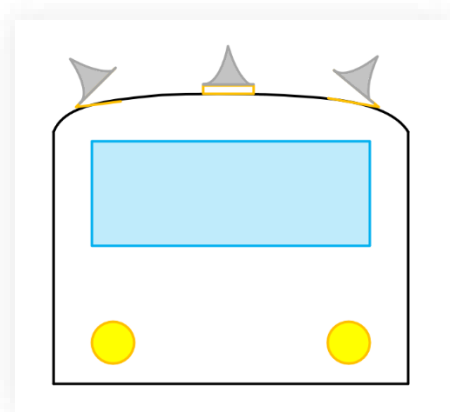


Figura 78 – Dibujo orientativo de la posición de las antenas embarcadas

El cable RF a utilizar en esta instalación es el RF *Feeder*, ver apartado 2.7.6.2.7.

### 2.7.6.3.3. Cable coaxial (RF *feeder*)

Mismo cable descrito en el apartado 2.7.6.2.7.

### 2.7.6.3.1. Cable coaxial (RF *jumper*)

Mismo cable descrito en el apartado 2.7.6.2.8.

## 2.7.7. Elementos software

Los elementos software a desplegar, en la plataforma virtual del centro de control, son los siguientes:

1. Paquete *software* para configuración y monitorización de los puntos de acceso y clientes [46]:
  - a. **HiDiscovery**: este software se utiliza para descubrir equipos de Belden en la red y asignarles una dirección IP para su configuración.



Figura 79 – HiDiscovery ventana principal

- b. **LANConfig**: como su nombre indica es la herramienta que se usa para actualizar la configuración y el *firmware* de los equipos.

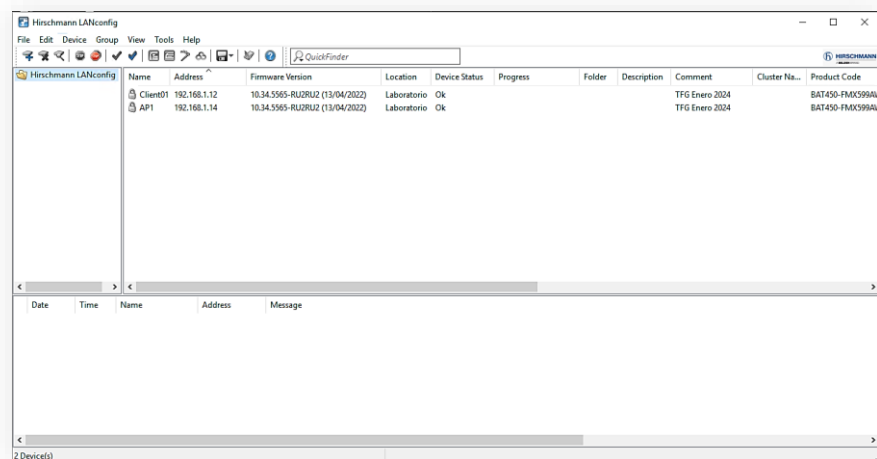


Figura 80 – LANConfig ventana principal

- c. **LANMonitor**: este software se usa para monitorizar los puntos de acceso y poder ver todos sus datos: canal, MCS negociado con el cliente, nivel de señal, etc.

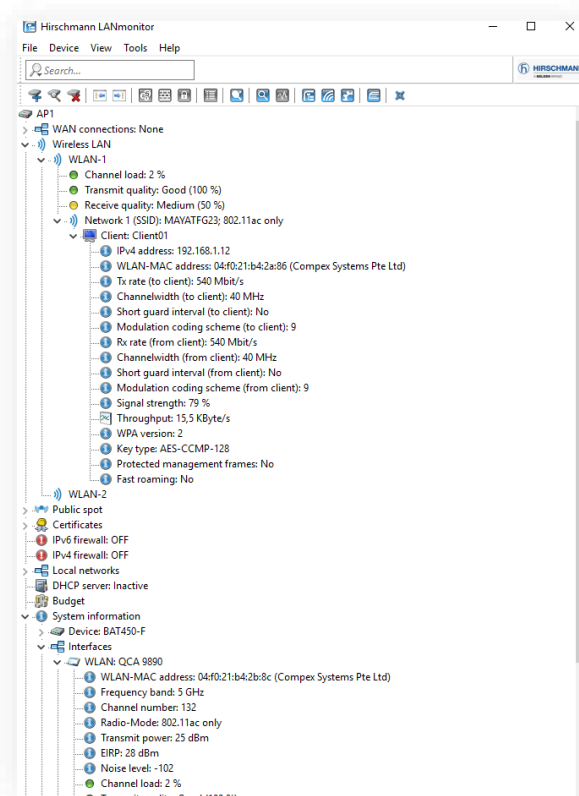


Figura 81 – LANMonitor ventana principal

2. WLC virtual [47], estas aplicaciones han sido ya descritas en el apartado 2.4.1:
  - a. **BAT-Controller Virtual**: este es el nombre de la aplicación por la que se va a controlar los puntos de acceso de manera centralizada.
  - b. **HiVision**: es el software NMS que se utilizará en el proyecto.  
Para más información, consultar el anexo del apartado 7.1.10.
  
3. Security Center: es un paquete software que incluye distintas aplicaciones y funcionalidades para poder ejecutar, entre muchas otras cosas, la descarga de grabaciones que se va a configurar en este proyecto [48]. La configuración que se usará en el proyecto se describirá en el apartado 2.10.4. El *datasheet* se incluye en 7.1.12.



Figura 82 – Security Center 5.11 - Genetec

## 2.7.8. Estudio económico

Una vez descritos todos los elementos de los que se compone el proyecto, se ha realizado estudio económico de la solución. Para ello, se han tenido en cuenta los precios de mercado y se ha realizado una búsqueda en los distintos proveedores: RS, Farnell, Belden, etc. En el anexo del apartado 7.7, se puede consultar las fuentes utilizadas para reflejar los precios de este estudio.

Tabla 15 – Estudio económico

Equipo	Modelo	Fabricante	Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
<b>Centro de Control</b>						
<b>Plataforma Virtual</b>						
<i>Hardware</i>						
Huawei (host)	K22R-02-AV612	Huawei	Atlas 800 (Model 3000)-Public Cloud AV612 configuration(2*Kunpeng 920,64 Core@2.6GHz,16*16G DDR4,1*480GB SATA SSD,1*960GB SAS SSD,1*Avago3408,8*25GE,6*Atlas 300 C,2*2000W AC),K22R-02.	1	66.000,00 €	66.000,00 €
Streamvault	SV-2020E-R18-168T-12-216	Genetec	Streamvault™ 2020E Series - 2U 18-Bay Appliance 168TB Raw RAID 6 1x Xeon Silver 4216 16GB RAM 2x 240GB M.2 SSD 14x 12TB NLSAS 4x 1GbE RJ45 2x 1100W PSU Windows Server 2019 Standard 5YR NBD KYHD Warranty - Genetec™ Security Center pre-installed. License sold separately	1	70.000,00 €	70.000,00 €
Switch tierra	S5731-S24P4X	Huawei	Huawei S5731-S24P4X (24*10/100/1000BASE-T ports,4*10GE SFP+ ports,PoE+)	1	1.100,00 €	1.100,00 €
Armario rack	WL202	Rackmatic	Armario rack 19" de pie 29U 600x800x1400mm MobiRack de RackMatic	1	412,54 €	412,54 €
<i>Software</i>						
Vsphere 8 (1 CPU)	VS8-EPL-C	VMware	VMware vsphere 8 Enterprise Plus for 1 processor	2	6.000,00 €	12.000,00 €
Security Center 5.11	Base	Genetec	Sistema base (core)	1	800,00 €	800,00 €
Omnicast	Módulo	Genetec	Módulo CCTV	1	3.500,00 €	3.500,00 €
Conexión 1 cámara	Licencia	Genetec	Licencia conexión a cámara	12	150,00 €	1.800,00 €
HiVision (licencia 32 nodos)	Industrial HiVision	Hirschmann	Hirschmann Industrial HiVision Network Management Software, 32 Node License. Keep HiVision up-to-date with Annual Maintenance Plan (Sold Separately).	1	4.700,00 €	4.700,00 €
BAT-Controller Virtual (licencia 100 puntos de acceso)	BAT-Controller Virtual	Hirschmann	Hirschmann Virtual BAT Controller License 100, Manage Up To 100 Access Points or VPN Connections, 64 ARF Contexts And Up To 500 Mbit/s Throughput.	1	11.000,00 €	11.000,00 €
<b>Total Centro de Control</b>						<b>171.312,54 €</b>
<b>Equipamiento de Vía (1 km)</b>						
Caja de vía	775-5814	RS PRO	Caja de pared RS PRO de Acero RAL 7032, con placa de montaje, 500 x 400 x 200mm, IP66	3	100,00 €	300,00 €
Punto de acceso	BAT450-F	Belden	Punto de acceso inalámbrico Hirschmann, 3 Puertos LAN, 450Mbit/s 2.4 GHz, 5 GHz IEEE 802.11 a/b/g/n	3	2.000,00 €	6.000,00 €
Fuente de alimentación	DIMENSION	PULSE	Fuente de alimentación 24V 80W	3	150,00 €	450,00 €
Convertor de medios	SPIDER-PL-40	Belden	Convertor de medios	3	350,00 €	1.050,00 €
Antenas	1356.17.0090	Huber&Sunher	Antennas WiFi Rail-Trackside, Directional 5 GHz, 18 dBi, Spot-L, IP 67, Vert.+ Dual-Slant +/-45 pol, 3 x 3 MIMO; Conn. N (f)	3	300,00 €	900,00 €
Surge arrestor	3400.17.0428	Huber&Sunher	Supresores de sobretensiones conectorizados Quarter-wave stub N plug(m) to N jack(f), 2000-6000MHz	9	180,00 €	1.620,00 €
Cable RF feeder (5 metros)	SPUMA_400	Huber&Sunher	Cable coaxial RG214 RS PRO, 50 Ω, con. A: Tipo N, Macho, con. B: Tipo N, Macho, long. 1m	9	90,00 €	810,00 €
Cable RF jumper (1 metro)	RADOX_RF_400	Huber&Sunher	Cables de RF / Coaxial, Tipo N Macho a Tipo N Macho, RG58, 50 ohm, 3.28 ft, 1 m	9	20,00 €	180,00 €
<b>Total por km de vía</b>						<b>11.310,00 €</b>
<b>Equipamiento de tren (1 cabina)</b>						
Antenas (shark)	1356.17.0010	Huber&Sunher	Antennas Railway Rooftop, WiFi directional, 5 GHz, 12dBi, vertical polarized; Connectors N, jack (f)	3	500,00 €	1.500,00 €
Cliente (módem embarcado)	BAT450-F	Belden	Punto de acceso inalámbrico Hirschmann, 3 Puertos LAN, 450Mbit/s 2.4 GHz, 5 GHz IEEE 802.11 a/b/g/n	1	2.000,00 €	2.000,00 €
Cable RF feeder (5 metros)	SPUMA_400	Huber&Sunher	Cable coaxial RG214 RS PRO, 50 Ω, con. A: Tipo N, Macho, con. B: Tipo N, Macho, long. 1m	3	90,00 €	270,00 €
Cable RF jumper (1 metro)	RADOX_RF_400	Huber&Sunher	Cables de RF / Coaxial, Tipo N Macho a Tipo N Macho, RG58, 50 ohm, 3.28 ft, 1 m	3	20,00 €	60,00 €
<b>Total por cabina de tren</b>						<b>3.830,00 €</b>
<b>TOTAL</b>						<b>186.452,54 €</b>

Para comprender la tabla anterior (Tabla 15), hay que especificar una serie de criterios previos:

- El estudio omite la parte de costes de instalación, obra civil y de EHS (*Environmental, Health & Safety*).
- Unido a los costes de instalación está todo lo relacionado con el pequeño material: cables ethernet, fibra óptica, repartidores, etc. Esto se negocia con la empresa instaladora antes de firmar el contrato de instalación. Incluso en algunos proyectos esto es alcance de obra civil, o empresa asociada, después de definir una serie de requisitos de instalación para el sistema.
- Se ha acotado el alcance a: centro de control (equipos centrales del cuarto de comunicaciones), tramo de un kilómetro de vía y una cabina de tren.
- En el caso de Genetec las licencias son individuales por cámara. Por lo tanto, se ha asumido un total de 12 cámaras por tren.
- Todo el equipamiento embarcado: cámaras, switches, etc. Están fuera del alcance del proyecto.

Además de todo lo expuesto anteriormente, cabe señalar que, estos precios (sobre todo a nivel de *hardware* y de componentes) experimentarán una reducción al comprar más unidades o al llegar acuerdos sobre cantidades con el proveedor.

Como conclusiones:

- El equipamiento del centro de control asciende a 171.312,54 €.
- Cada tramo de un kilómetro de vía tendrá un coste asociado de 11.310 €.
- Cada cabina de tren tiene un coste de implementación del sistema WiFi de 3.830 €.
- **El presupuesto total es de 186.452,54 €.**

Hay que señalar que los sistemas de seguridad se ofertan en proyectos de países desarrollados o en vía de desarrollo. Por tanto, el coste asociado a la tecnología, propuesta en este proyecto, es bastante asumible dado los presupuestos que se invierten en este tipo de proyectos.



## 2.8. Cálculos teóricos previos

Para el cálculo de datos teóricos se ha usado la fórmula del balance de potencias. A través de esta fórmula, se puede estimar el nivel de señal recibido, por el equipo, y comprobar que es suficiente para asegurar los valores de *data rate* y *throughput* indicados por el fabricante de los puntos de acceso.

Esto consiste en el cálculo de la señal, en el receptor, teniendo en cuenta todos los elementos que intervienen en la cadena. Estos elementos aportan una serie de valores con relación a las pérdidas y ganancias del sistema inalámbrico del estudio (ver Figura 83).

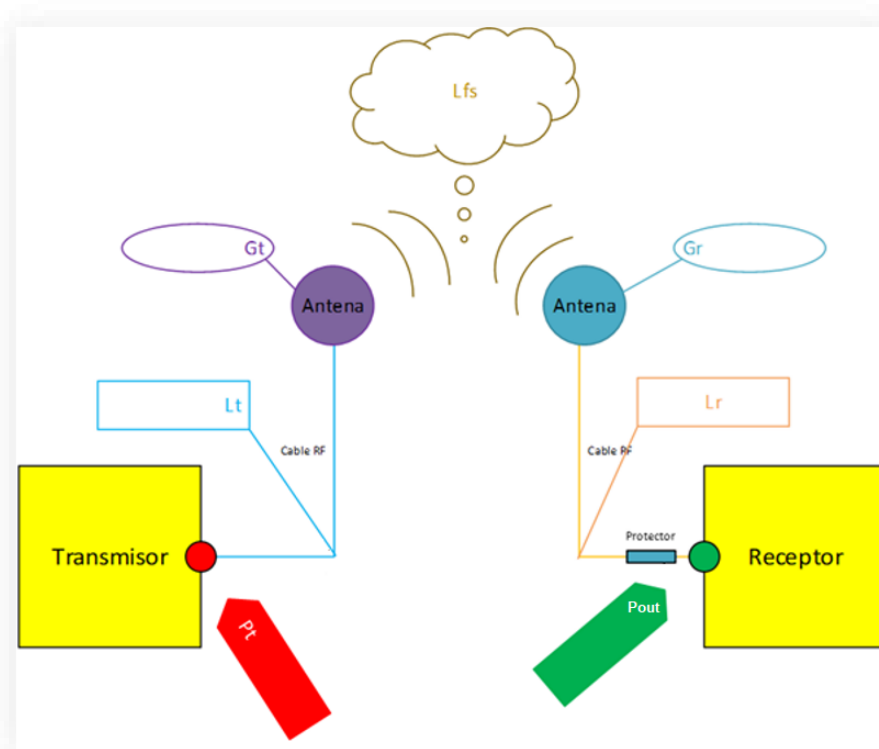


Figura 83 – Esquema con elementos que componen el balance de potencias

Para aplicar la fórmula, se debe tener en cuenta los siguientes elementos que intervienen en el sistema [43]:

- Potencia transmitida [Pt]: es el nivel de señal que genera el transmisor en su salida (previo a los cables RF y antenas).
- Ganancia del transmisor [Gt]: en este parámetro se tiene en cuenta la ganancia de la antena conectada al transmisor y si existiese algún amplificador intermedio (en este proyecto solo hay conectada la antena).
- Pérdidas en el transmisor [Lt]: se tendrá en cuenta las pérdidas en el lado del transmisor, tales como el cable RF, protectores de corriente (para evitar daños por

sobretensión eléctrica), divisores de señal, ... Para este proyecto se tendrá en cuenta a atenuación del cable RF y el protector radioeléctrico (*surge arrestor*).

- Pérdida en el espacio libre [Lfs]: es la pérdida de energía durante la propagación de la señal por el aire que separa el sistema transmisor del sistema receptor. Este valor depende de la frecuencia de trabajo (f) del sistema en análisis, y de la distancia en kilómetros (d) que separa a ambos.

Para este estudio, se utiliza la fórmula de Friis para el modelo de propagación de ondas en espacio libre. Esta decisión se toma porque se trata de un enlace radio en media distancia (por lo que variables como la curvatura de la tierra no influyen en el cálculo) y con línea de vista (ausencia de obstáculos).

$$FSPL = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32.44$$

Figura 84 – Fórmula de Friis [43]

- Pérdidas diversas [Lm]: en este parámetro, se tendrá en cuenta el valor de todas las pérdidas que no estén contempladas en el resto de la fórmula. Por ejemplo, obstáculos que pueda encontrar la señal en su propagación. En este proyecto, por el trazado de la vía y disposición del depósito de trenes, se asume 0 dB. Las antenas en vía, y en el tren, se instalan en zonas en las que el sistema radio tiene vista directa sin obstáculos (las curvas en vía no son muy cerradas y, por necesidad de rodaje de los trenes, no existen barreras arquitectónicas en la vía).
- Ganancia del receptor [Gr]: al igual que en el caso del transmisor, aquí se tendrá en cuenta la ganancia de la antena y, si existiera, algún amplificador entre antena y receptor. En este caso sólo se tendrá en cuenta la ganancia de la antena.
- Pérdidas del receptor [Lr]: pérdidas en el lado de la cadena del receptor. En este proyecto la pérdida es debido al cable RF entre antena y receptor.

Con los conceptos anteriores claros, se procede a enunciar la fórmula a utilizar para calcular la potencia recibida en la entrada del punto de acceso, que debe ser superior a la sensibilidad del equipo:

$$P_{out} = P_t + G_t - L_t - L_{fs} - L_m + G_r - L_r$$

Figura 85 – Fórmula de balance de potencias [43]

Por otra parte, se analizan los valores mínimos necesarios del equipo receptor para garantizar que el sistema WIFI alcance el *coding*. Estos valores mínimos se reflejan y desarrollan en los siguientes apartados.

Consultando el manual de usuario del punto de acceso (más información en el anexo 7.2.1), se puede observar la tabla que especifica el fabricante para los valores MCS:

Tabla 16 – Tabla con los requisitos de potencia y sensibilidad MCS para 20MHz y MIMO 3x3

IEEE 802.11ac		
IEEE 802.11ac		
Frequency range 5.180 GHz to 5.825 GHz		
Bandwidth 20 MHz		
Coding	Transmit power	Receiving sensitivity
MCS 0	23 dBm	-93 dBm
MCS 1	23 dBm	-90 dBm
MCS 2	23 dBm	-87 dBm
MCS 3	23 dBm	-83 dBm
MCS 4	23 dBm	-80 dBm
MCS 5	22 dBm	-77 dBm
MCS 6	21 dBm	-74 dBm
MCS 7	19 dBm	-73 dBm
MCS 8	18 dBm	-71 dBm

La tabla anterior muestra los valores, para los distintos MCS, que se pueden alcanzar en 20MHz (usando 3 streams: MIMO 3x3). La sensibilidad de recepción o *receiving sensitivity* es el valor mínimo de potencia que tiene que llegar al equipo. Con estos datos, se ha completado la Tabla 17 con el valor SNR para el *coding* MCS más alto que se puede alcanzar. Se ha fijado un nivel de ruido, en campo, de -92dBm.

Tabla 17 – SNR mínimo con los datos para 20MHz y MIMO 3x3

20Mhz	Mimo 3x3		
Coding	Tx Pwr (dBm)	Rx Sensibilidad (dBm)	SNR min campo (dB)
MCS 8	18	-71	21

Estos datos se interpretan de la siguiente forma, se especifica una potencia de transmisión (18 dBm) y una sensibilidad de recepción (-71dBm). Por lo tanto, el SNR calculado es:

- $-71\text{dBm} - (-92\text{ dBm}) = 21\text{ dB}$

El objetivo de los cálculos teóricos es cubrir la mayor distancia de terreno con el menor número de puntos de acceso (y así reducir costes). Se considera el peor escenario: campo y escenario en movimiento, la zona de cobertura en depósito tiene menos extensión que la que se plantea para la zona de vía.

Para 20MHz se necesita una señal en la recepción de -71dBm y un SNR de 21dB (ver Tabla 17). Por tanto, a nivel teórico, la distancia máxima que se puede cubrir con un punto de acceso son unos 500 metros (frecuencia 5660MHz):

Tabla 18 – Cálculos teóricos para canales de 20MHz en distancia máxima

			MiMo 3x3 20MHz MCS 8 Prx = 18dBm Srx = -71dBm	
		Unidad	Valor	
Pt	Potencia de transmisión del punto de acceso	dBm	N/A	18
	Conectores	dB	-1	-1
Lt	Coaxial del AP al acoplador (0,35 db/m) [5m]	dB	-1,75	-1,75
	Protector contra descargas (surge arrestor)	dB	-0,5	-0,5
Gt	Ganancia antena vía	dB	16	16
	<b>PIRE (Pt-Lt+Gt)</b>	<b>dBm</b>	<b>N/A</b>	<b>30,75</b>
Lfs	Pérdidas en el aire (distancia 500 m y frec 5660 Mhz)	dB	-101,48	-101,48
Gr	Ganancia antena tren	dB	12	12
	Cable coaxial del radio modem a las antenas (0,35db/m) [5m]	dB	-1,75	-1,75
Lr	Conectores	dB	-1	-1
	Sensibilidad del receptor	dBm	N/A	-61,48
	Sensibilidad con margen de <i>fading</i>	dBm	9	<b>-70,48</b>
	Sensibilidad del receptor mínima (fabricante)	dBm	N/A	-71
	<b>SNR (Ruido en campo -92dBm)</b>	<b>dB</b>	<b>N/A</b>	<b>21,52</b>

Esta distancia teórica no es asumible, por diversos motivos:

- Los resultados están al límite de los valores especificados por el fabricante. Asumir la distancia, con estos datos teóricos, puede acarrear problemas a futuro. Siempre hay que establecer un margen de confianza.
- Por experiencia previa con equipos similares, a -71dBm, el MCS máximo no es alcanzable.
- También hay que considerar que los puntos de acceso pueden fallar. Ante un fallo, se producirá un hueco de cobertura que deberá cubrirse con los APs más cercanos.
- Un tren a 500 metros puede hacer una curva muy pronunciada y perder la visión directa de las antenas. Esto implica que el radioenlace puede perder la directividad por topografía. Por experiencia, un margen de 350-400 metros es la mejor opción.

Además, se aplica un margen de guarda de 9 dBm en los resultados de la señal recibida. Esto se hace para asegurar que se tiene en cuenta factores como el *fading* en la señal (desvanecimientos en la señal por multicaminos) u otros efectos adversos en campo.

Por ello, se toma la decisión de establecer una distancia máxima de 350 metros entre puntos de acceso. Considerando que, para un kilómetro de vía, la instalación de 3 puntos de acceso garantizará la funcionalidad del sistema, aun estando, en modo degradado.

Repitiendo los cálculos, para la nueva distancia, se obtiene que el nivel de recepción en el cliente es de -67dBm y un SNR 25dB (cumpliendo los requisitos mínimos del fabricante expuestos en la Tabla 16 y Tabla 17):

Tabla 19 – Cálculos teóricos para canales de 20MHz con una distancia de 350 metros

				MiMo 3x3 20MHz	
				MCS 8	
				Prx = 18dBm	
				Srx = -71dBm	
		Unidad	Valor		
Pt	Potencia de transmisión del punto de acceso	dBm	N/A	18	
Lt	Conectores	dB	-1	-1	
	Coaxial del AP al acoplador (0,35 db/m) [5m]	dB	-1,75	-1,75	
	Protector contra descargas (surge arrestor)	dB	-0,5	-0,5	
Gt	Ganancia antena vía	dB	16	16	
	PIRE (Pt-Lt+Gt)	dBm	N/A	30,75	
Lfs	Pérdidas en el aire (distancia 350 m y frec 5660 Mhz)	dB	-98,38	-98,38	
Gr	Ganancia antena tren	dB	12	12	
Lr	Cable coaxial del radio modem a las antenas (0,35db/m) [5m]	dB	-1,75	-1,75	
	Conectores	dB	-1	-1	
	Sensibilidad del receptor	dBm	N/A	-58,38	
	Sensibilidad con margen de fading	dBm	9	-67,38	
	Sensibilidad del receptor mínima (fabricante)	dBm	N/A	-71	
	SNR (Ruido en campo -92dBm)	dB	N/A	24,62	

Los mismos valores han sido calculados para 40MHz:

Tabla 20 – Tabla con los requisitos de potencia y sensibilidad MCS para 40MHz y MIMO 3x3

IEEE 802.11ac Frequency range 5.180 GHz to 5.825 GHz Bandwidth 40 MHz		
Coding	Transmit power	Receiving sensitivity
MCS 0	23 dBm	-90 dBm
MCS 1	23 dBm	-88 dBm
MCS 2	23 dBm	-85 dBm
MCS 3	22 dBm	-82 dBm
MCS 4	22 dBm	-79 dBm
MCS 5	21 dBm	-75 dBm
MCS 6	20 dBm	-73 dBm
MCS 7	19 dBm	-73 dBm
MCS 8	18 dBm	-69 dBm
MCS 9	18 dBm	-67 dBm

Y en cuanto a valores de SNR:

Tabla 21 – SNR mínimo con los datos para 40MHz y MIMO 3x3

40Mhz	Mimo 3x3		
Coding	Tx Pwr (dBm)	Rx Sensibilidad (dBm)	SNR min campo (dB)
MCS 9	18	-67	25

Repitiendo los cálculos, para canales de 40MHz de ancho de banda, se obtiene que el nivel de recepción en el cliente es de -67dBm y un SNR 25dB (cumpliendo los requisitos mínimos del fabricante expuestos en la Tabla 20 y Tabla 21):

Tabla 22 – Cálculos teóricos para canales de 40MHz con una distancia de 350 metros

			Unidad	Valor	MiMo 3x3 40MHz MCS9 Prx = 18dBm Srx = -67dBm
Pt	Potencia de transmisión del punto de acceso		dBm	N/A	18
Lt	Conectores		dB	-1	-1
	Coaxial del AP al acoplador (0,35 db/m) [5m]		dB	-1,75	-1,75
	Protector contra descargas (surge arrestor)		dB	-0,2	-0,2
Gt	Ganancia antena vía		dB	16	16
	<b>PIRE (Pt-Lt+Gt)</b>		dBm	N/A	31,05
Lfs	Pérdidas en el aire (distancia 350 m y frec 5660 Mhz)		dB	-98,38	-98,38
Gr	Ganancia antena tren		dB	12	12
Lr	Cable coaxial del radio modem a las antenas (0,35db/m) [5m]		dB	-1,75	-1,75
	Conectores		dB	-1	-1
	Sensibilidad del receptor		dBm	N/A	-58,08
	Sensibilidad con margen de <i>fading</i>		dBm	9	<b>-67,08</b>
	Sensibilidad del receptor mínima (fabricante)		dBm	N/A	-67
	<b>SNR (Ruido en campo -92dBm)</b>		dB	N/A	24,92

Para 80MHz, el manual indica los valores de la Tabla 23. Estos valores, aunque no se aplicarán en campo (ver 2.7.4), se van a probar en el laboratorio.

Tabla 23 – Tabla con los requisitos de potencia y sensibilidad MCS para 80MHz y MIMO 3x3

IEEE 802.11ac Frequency range 5.180 GHz to 5.825 GHz Bandwidth 80 MHz		
Coding	Transmit power	Receiving sensitivity
MCS 0	23 dBm	-88 dBm
MCS 1	23 dBm	-86 dBm
MCS 2	23 dBm	-84 dBm
MCS 3	22 dBm	-81 dBm
MCS 4	22 dBm	-77 dBm
MCS 5	21 dBm	-74 dBm
MCS 6	20 dBm	-73 dBm
MCS 7	19 dBm	-70 dBm
MCS 8	18 dBm	-67 dBm
MCS 9	18 dBm	-66 dBm

Los valores SNR calculados para 80MHz son:

Tabla 24 – SNR mínimo con los datos para 80MHz y MIMO 3x3

80MHz	Mimo 3x3		
Coding	Tx Pwr (dBm)	Rx Sensibilidad (dBm)	SNR min campo (dB)
MCS 9	18	-66	26

En los cálculos, para canales de 80MHz de ancho de banda, se obtiene que el nivel de recepción en el cliente es de -67dBm y un SNR 24dB (al límite de los requisitos mínimos del fabricante expuestos en la Tabla 20 y Tabla 21) por lo que en esta ocasión a 350 metros en 80MHz se negociaría un *coding* MCS9 o MCS8:

Tabla 25 – Cálculos teóricos para canales de 80MHz con una distancia de 350 metros

		Unidad	Valor	Mimo 3x3 80MHz MCS9 Prx = 18dBm Srx = -66dBm
Pt	Potencia de transmisión del punto de acceso	dBm	N/A	18
Lt	Conectores	dB	-1	-1
	Coaxial del AP al acoplador (0,35 db/m) [5m]	dB	-1,75	-1,75
	Protector contra descargas (surge arresstor)	dB	-0,2	-0,2
Gt	Ganancia antena vía	dB	16	16
	<b>PIRE (Pt-Lt+Gt)</b>	<b>dBm</b>	<b>N/A</b>	<b>31,05</b>
Lfs	Pérdidas en el aire (distancia 350 m y frec 5660 Mhz)	dB	-98,38	-98,38
Gr	Ganancia antena tren	dB	12	12
Lr	Cable coaxial del radio modem a las antenas (0,35db/m) [5m]	dB	-1,75	-1,75
	Conectores	dB	-1	-1
	Sensibilidad del receptor	dBm	N/A	-58,08
	Sensibilidad con margen de <i>fading</i>	dBm	N/A	<b>-67,08</b>
	Sensibilidad del receptor mínima (fabricante)	dBm	N/A	-66
	<b>SNR (Ruido en campo -92dBm)</b>	<b>dB</b>	<b>-90</b>	<b>24,92</b>

A continuación, se indica la velocidad de transferencia que se puede alcanzar dependiendo del ancho de banda del canal y el *coding* asociado. Para MCS9 se alcanza un máximo de 260Mbps, 540Mbps y 1170 Mbps (en canales de 20MHz, 40MHz y 80MHz respectivamente).

Tabla 26 – Valores MCS, SMR y RSSI para 3 flujos [44]

802.11n and 802.11ac		MCS, SNR and RSSI												wirelessLAN					
HT MCS	VHT MCS	Modulation	Coding	20MHz				40MHz				80MHz				160MHz			
				Data Rate 800ns	Data Rate 400ns	Min. SNR	RSSI	Data Rate 800ns	Data Rate 400ns	Min. SNR	RSSI	Data Rate 800ns	Data Rate 400ns	Min. SNR	RSSI	Data Rate 800ns	Data Rate 400ns	Min. SNR	RSSI
3 Spatial Streams																			
16	0	BPSK	1/2	19.5	21.7	2	-82	40.5	45	5	-79	87.8	97.5	8	-76	175.5	195	11	-73
17	1	QPSK	1/2	39	43.3	5	-79	81	90	8	-76	175.5	195	11	-73	351	390	14	-70
18	2	QPSK	3/4	58.5	65	9	-77	121.5	135	12	-74	263.3	292.5	15	-71	526.5	585	18	-68
19	3	16-QAM	1/2	78	86.7	11	-74	162	180	14	-71	351	390	17	-68	702	780	20	-65
20	4	16-QAM	3/4	117	130.3	15	-70	243	270	18	-67	526.5	585	21	-64	1053	1170	24	-61
21	5	64-QAM	2/3	156	173.3	18	-66	324	360	21	-63	702	780	24	-60	1404	1560	27	-57
22	6	64-QAM	3/4	175.5	195	20	-65	364.5	405	23	-62	780	855	26	-59	1580	1755	29	-56
23	7	64-QAM	5/6	195	216.7	25	-64	405	450	28	-61	877.5	975	31	-58	1755	1950	34	-55
	9	256-QAM	5/6	260	288.9	31	-57	540	600	34	-54	1170	1300	37	-51	2106	2340	38	-50

Por último, una vez expuesto todos los datos teóricos y definir la distancia máxima entre APs de 350 metros, se inicia la etapa de simulación por software (3.1) y pruebas en laboratorio (3.2). Todo esto, servirá para comprobar si los cálculos teóricos son correctos o, si, por el contrario, se debe hacer algún tipo de cambio en el diseño.



## 2.9. Pruebas simuladas por software

Para la simulación, de la cobertura radio del sistema, se ha optado finalmente por la opción del software *EKahau Site Survey* version 9.1.0:

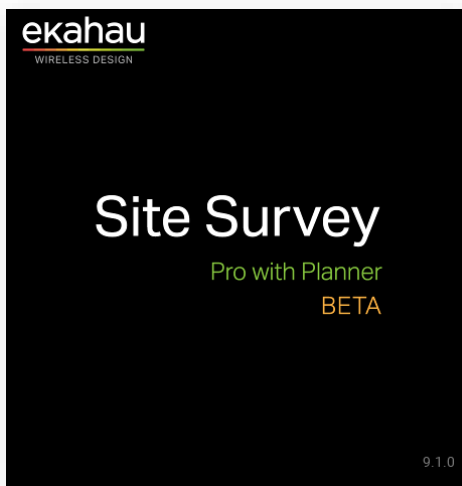


Figura 86 – Esquema con elementos que componen el balance de potencias

Los motivos por lo que se tomó esta decisión fueron los siguientes:

- Este software lleva años desarrollándose y calibrándose, con datos reales. En el proyecto del BBVA, se comprobó que el resultado de la simulación fue correcto, en un 90-95%, una vez desplegada la solución [45].
- El programa incluye, en sus librerías, datos para los equipos de BELDEN con los que se va a realizar la simulación.
- Aporta variedad de cálculos simulados: interferencias, SNR (*Signal to Noise Ratio*), *data rate*, y no sólo datos sobre nivel de señal alcanzada.
- Por otro lado, se descartó el uso de XIRIO, ya que la licencia UOC no estaba disponible este cuatrimestre.

## 2.9.1. Descripción de simulación de cobertura en Talleres y Cocheras

Para la simulación realizada en este apartado, se ha utilizado un mapa de la zona, de Google Earth. Además, con la herramienta regla se ha marcado la distancia de la zona que se va a cubrir (200x60 metros).

El proceso de simulación es el siguiente:

- 1) Se importa el mapa a utilizar en el estudio.



Figura 87 – Cobertura WiFi en Talleres y Cocheras (depósito de trenes)

- 2) Se añaden los puntos de acceso en las zonas en las que se quiere dar cobertura WiFi del sistema.



Figura 88 – Selección de ubicación para los puntos de acceso

3) Se selecciona el modelo de los puntos de acceso a utilizar.

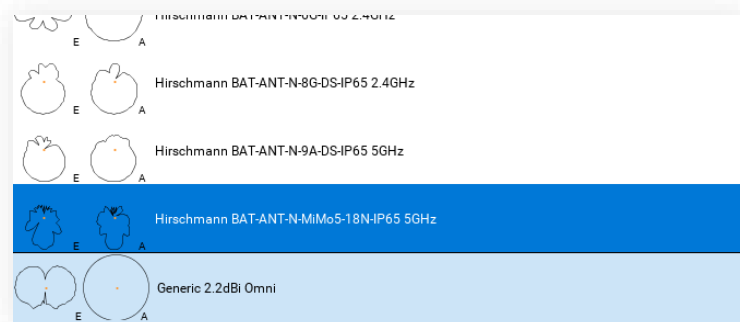


Figura 89 – Modelo de AP Hirschmann (5GHz y MIMO) a utilizar en la simulación

4) Se definen todos los parámetros para la simulación:

- a. Potencia transmitida por el AP (12 dBm) esto equivale a PIRE de 30dBm. Mismo valor que obtenido en los cálculos teóricos del apartado 2.8.
- b. Altura a la que se encuentra la antena (5.5 metros). Este dato es resultado de haber considerado la altura de los trenes (4,2 metros) y elevar las antenas de tierra 1.3 metros para asegurar una visibilidad correcta.
- c. Ángulo de emisión (0°), no se considera necesario ningún ángulo de inclinación.
- d. Número de flujos que permite la antena, como se usa un modelo MIMO 3x3 el valor de “Supported Spatial Streams” es 3.
- e. El intervalo de guarda se ha configurado como el mayor (800ns) por eso no aparece marcada la opción “Short Guard Interval”.

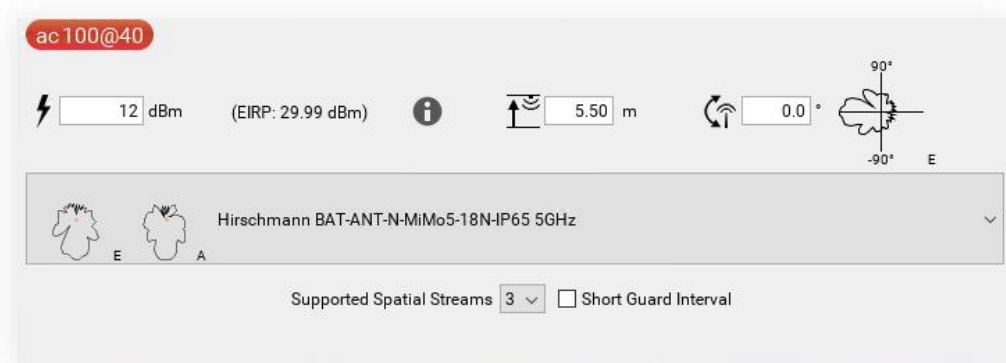


Figura 90 – Configuraciones varias sobre la instalación

5) Se configura la tecnología, ancho de banda del canal y frecuencia de los canales a utilizar:



Figura 91 – Configuraciones varias sobre la tecnología a utilizar

Se selecciona “802.11ac@5GHz”, 40MHz y los canales (100-104, 108-112 o 132-136).

- 6) Una vez que los puntos de acceso están ubicados y configurados, el software permite ver los valores de datos como: SNR, nivel de señal, *throughput*, etc. Todo esto desde el desplegable de la zona de simulación:

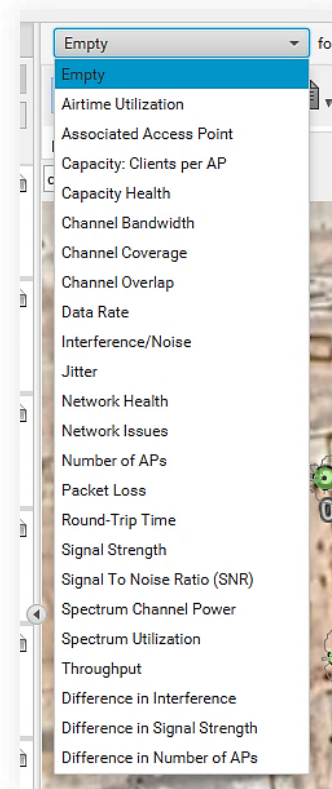


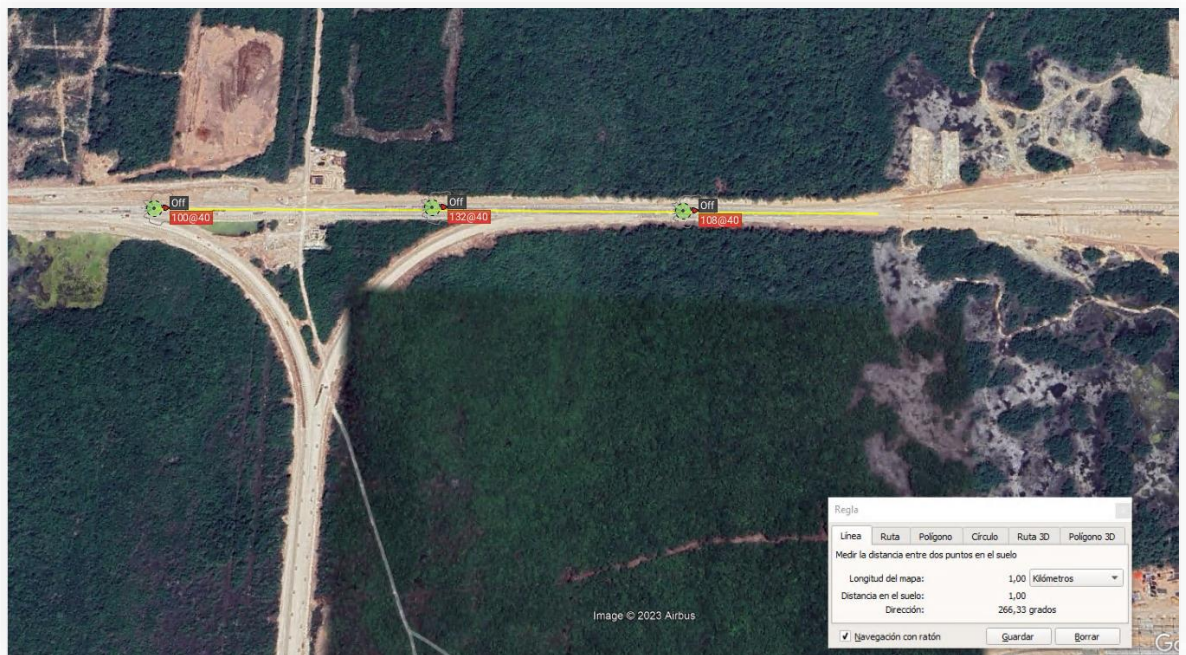
Figura 92 – Listado de datos que proporciona la simulación



## 2.9.1. Descripción de simulación de cobertura en vía

El proceso de simulación en vía es similar al comentado en el apartado anterior pero esta vez simulando la cobertura a lo largo de la vía.

Se ha tenido en cuenta un tramo de 1 kilómetro de distancia colocando los puntos de acceso a 350 metros unos de otros.



*Figura 93 – Plano para cobertura WiFi a lo largo de 1 kilómetro de vía*

Los resultados de esta simulación se encuentran reflejados en el apartado **3.1**.

## 2.10. Pruebas en laboratorio

### 2.10.1. Descripción de plataforma de pruebas

Para las pruebas en laboratorio se van a configurar dos escenarios distintos dependiendo del objetivo:

- Plataforma para pruebas de *throughput* en estático (configuración 1):

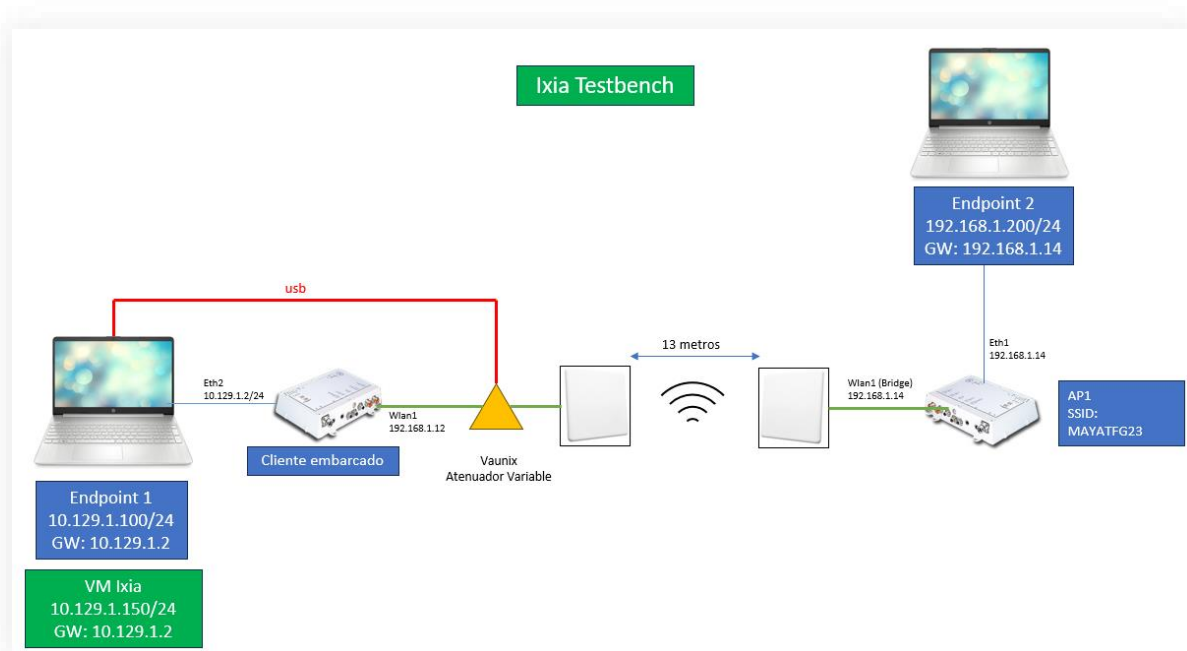


Figura 94 – Plataforma de pruebas [Configuración 1]

Esta configuración consta de los siguientes elementos:

- 2 ordenadores portátiles: el llamado *endpoint 1* simula el equipo de tren y el *endpoint 2* simula el servidor de tierra donde se almacenarán las grabaciones.
- 1 cliente embarcado (BATF-450): este equipo se configura como “Client” y es el equipo que se instalará dentro del tren.
- 1 punto de acceso (BATF-450): configurado como “Access Point” y en este caso es un equipo de tierra, de los que se instalarán en los postes dedicados o aprovechando los postes de catenaria (dependiendo el trazado de vía/depósito).



Figura 95 – Equipo BAT450-F

- 2 antenas MIMO 3x3: estas antenas están conectadas a los equipos BAT-F en la etapa de radio (ANT1, ANT2 y ANT3) con 3 cables RF *feeder* cada uno. Se han conectado como:  $-45^\circ$ /Antena1, VER/Antena2 y  $+45^\circ$ /Antena3 en ambos lados (cliente y AP).

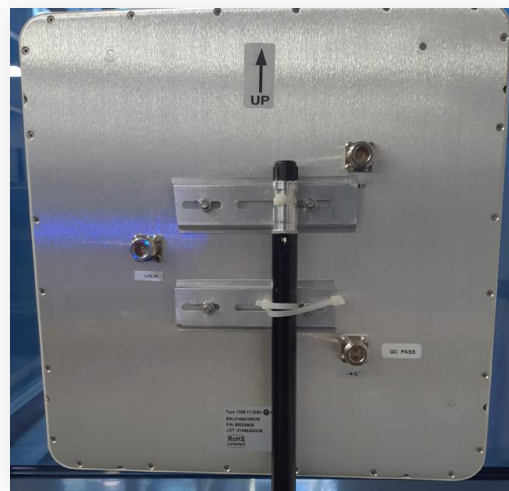


Figura 96 – Antena (MIMO 3x3) conectada con 3 cables RF al AP y al cliente

- Atenuador variable 90dB (LDA-906V-8): instalado entre el cliente y su antena, se han usado latiguillos RF *jumper* para enlazar con los RF *feeder*, con este elemento se fuerza el nivel de señal para poder simular los distintos MCS del sistema. Está conectado por USB al PC embarcado y se administra a través de una aplicación software.





Figura 97 – Atenuador variable

Para más información ver *datasheet* en el anexo del apartado **7.1.4**.

- **Software:** para llevar a cabo las medidas se ha instalado una herramienta de la empresa Ixia que se denomina “IxChariot versión 9.2”. Con esta herramienta se generan flujos desde un *endpoint* a otro para comprobar el *throughput* máximo se alcanza dependiendo el nivel de señal, SNR y MCS de los equipos bajo prueba.

El procedimiento de pruebas para esta configuración se describe más adelante, ver **2.10.2.3**.

- Plataforma para pruebas de *throughput* en dinámico (configuración 2):

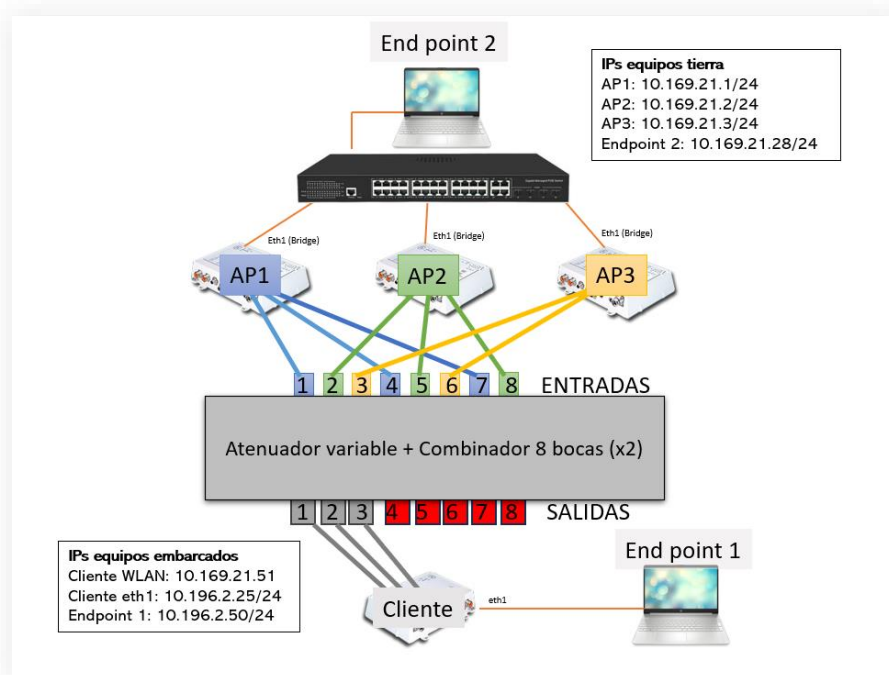


Figura 98 – Plataforma de pruebas [Configuración 2]

Para esta configuración se usan los siguientes elementos:

- Atenuador variable + Combinador de 8 bocas: en esta configuración se tiene que simular el movimiento del tren utilizando el atenuador variable programable. El atenuador de 8 bocas se ha unido a un combinador de señal para mezclar las señales de todas las entradas (APs) y transmitir las a las salidas (cliente). Para que este dato sea más gráfico se muestra la Figura 99, la única diferencia es que el de la imagen:



Figura 99 – Atenuador variable + combinador 8 bocas

El equipo de la Figura 99 tiene instalados 2 combinadores de 4 bocas, para las pruebas dinámicas de este proyecto se sustituyó por uno de 8 bocas ya que se necesitaba la señal de todas las entradas combinadas en la salida. Utilizando en programa de VAUNIX para controlar la atenuación de cada boca del atenuador se consigue ir atenuando y aumentando la señal de los distintos puntos de acceso como ocurriría en movimiento en vía al alejarse/acercarse las antenas del tren a los distintos puntos de acceso instalados en vía.

- 1 cliente embarcado (OBM, On Board Modem): conectado a la salida del atenuador variable con cables RF de tipo *feeder*. Antena 1 a la salida 1, la antena 2 a la salida 2 y la antena 3 a la salida 3. También se han colocado cargas en los conectores RF que no se utilizan (4-8).



Figura 100 – Conexión del cliente (OBM) al atenuador

- 3 puntos de acceso: configurados como AP1, AP2 y AP3 conectados con cables RF jumpers al atenuador variable. La conexión se ha realizado de la siguiente manera: AP1-Ant1/input1, AP2-Ant1/Input2, AP3-Ant1/Input3, AP1-Ant2/Input4, AP2-Ant2/Input5, AP3-Ant2/Input6, AP1-Ant3/Input7 y AP2-Ant3/Input8. Para la antena 3 del AP3 se ha colocado una carga ya que no existía la posibilidad de añadir una entrada 9, por lo que el AP3 sólo podrá funcionar en MIMO 2x2, se asume que es un punto de acceso en modo degradado (ver Figura 102).



Figura 101 – Conexión de los puntos de acceso al atenuador



Figura 102 – Detalle de la conexión del AP3

- Se ha configurado un portátil en la parte de tierra y otro en la parte embarcada: estos equipos harán la función de *endpoint* o sonda para la medida de *throughput*. En el caso del portátil embarcado existirá una conexión por cable USB para controlar y programar el atenuador.

A nivel de software se utilizan los mismos programas que se utilizaron en la configuración anterior: las herramientas de Hirschmann, el programa de atenuación y se realizarán las medidas con IxChariot (de la empresa Ixia).

Los resultados de las pruebas, en estático y en dinámico, se encuentran reflejadas en los apartados 3.2.1 y 3.2.2.

## 2.10.2. Descripción de pruebas de *throughput* en estático

Para este proyecto se han definido 3 parámetros básicos que serán comunes a todos los equipos:

1. SSID: **MAYATFG23**
2. Contraseña red WiFi cifrada usando el protocolo WPA versión 2.
3. Contraseña de acceso a los equipos para la administración web o con la herramienta del fabricante.

Una vez definidos estos parámetros comunes se procede a la configuración según la función del mismo: punto de acceso o cliente.

Además, para los equipos se ha instalado la versión de *firmware* más actual liberada a fecha diciembre de 2023 desde la web del fabricante:

<https://hirschmann-support.belden.com/en-US/downloads/files/hilcos-10-34-5565-ru2-zip>

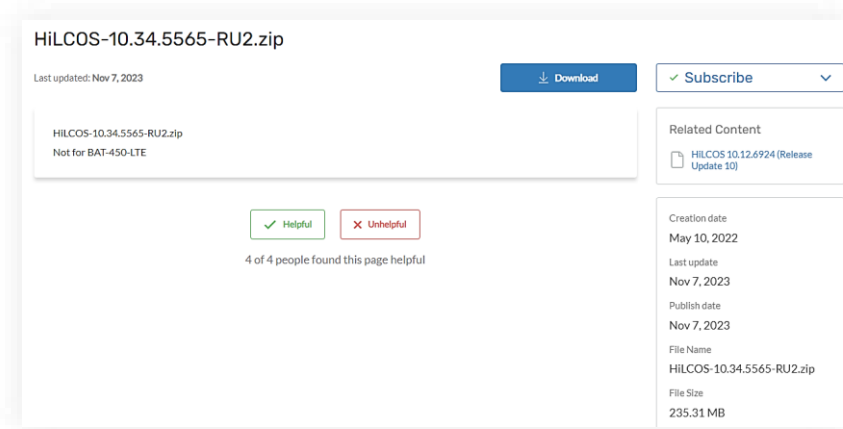


Figura 103– Última versión de *firmware* liberada a 7/11/2023

## 2.10.2.1. Configuración de los equipos de prueba

El punto de acceso y cliente se ha configurado para transmitir en el canal 132 (5660MHz)-MIMO 3x3.

Por extensión del documento se desplaza el detalle de la configuración al anexo 7.3.

## 2.10.2.2. Configuración de la herramienta de medida de *throughput*

Como se puede observar en la Figura 104 en la ventana de configuración se define:

- Los grupos de flujo (1): en este caso tren-tierra, tierra-tren, además se puede ir desactivando/activando según la prueba a realizar.
- Dentro de cada grupo de flujo se definen los flujos en detalle (2). Para las siguientes pruebas, se ha definido un grupo de RTP HDX de 18 Mbps, tal y como se puede observar en la Figura 105. Además, se ha configurado el número de usuarios como 10, por lo tanto, esto implica un *throughput* máximo de 180 Mbps. Una vez definida la prueba se pulsa en el botón “start test” y pasado el tiempo indicado en “Test Duration” aparece una gráfica y estadísticas sobre la tasa de transferencia (máximo, mínimo y media), ver Figura 106.

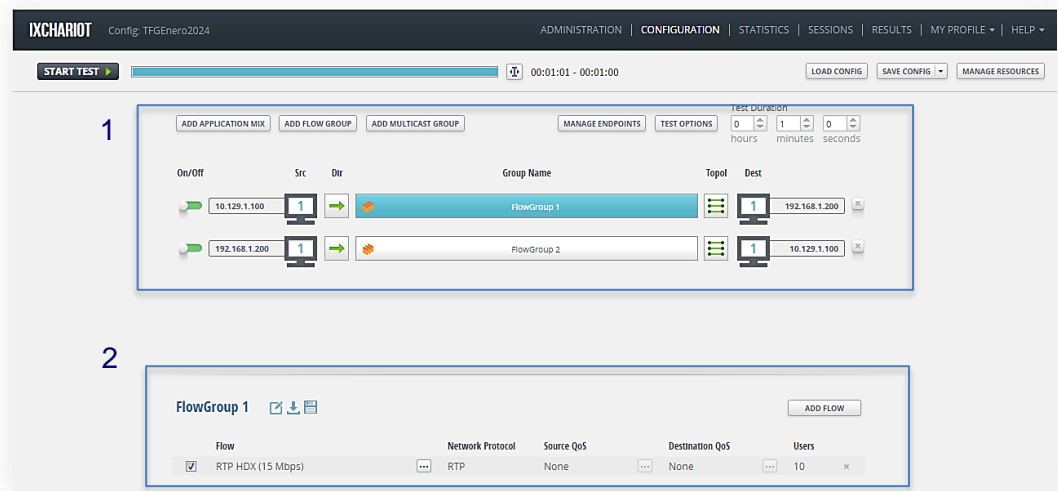


Figura 104 – Configuración de flujos en IxChariot 9.2

EDIT FLOW			
Parameter	Current Value	Default Value	Comment
Video Codec	H264_AVC	H264_AVC	The Video encoding algo...
RTP Payload Type	96	96	The RTP Payload type use...
Frames per Datagram	7	7	The number of media fra...
Media Frame Size	188	188	The media frame size for t...
Bit Rate	18 Mbps	15 Mbps	The nominal data rate of t...
Initial Delay (ms)	0	0	Delay before starting the t...
Source Port	Auto	Auto	What port to use for source
Destination Port	Auto	Auto	What port to use for destin...

Figura 105 – Detalle de configuración de flujo para prueba estática

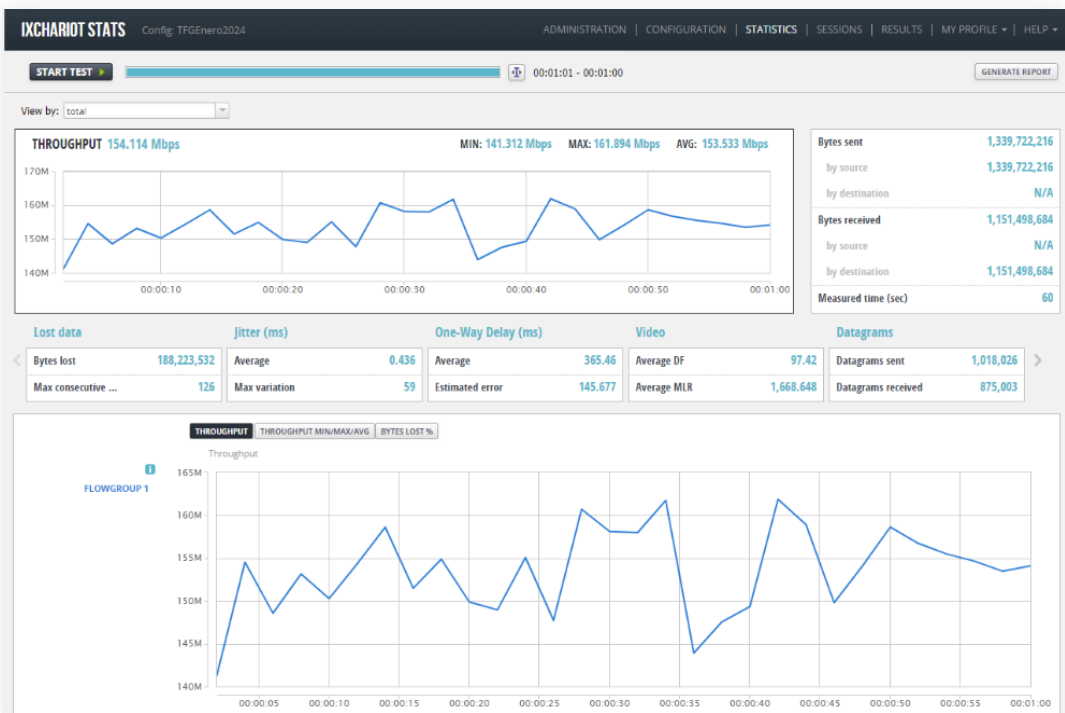


Figura 106 – Ejemplo de resultado de prueba de throughput

### 2.10.2.3. Procedimiento de pruebas

En este apartado se describe la metodología de pruebas que se va a seguir, una vez definidas las configuraciones y la herramienta de medida, para medir el *throughput* de los equipos modificando su nivel de señal y, por lo tanto, el MCS negociado entre ellos.

Utilizando el atenuador variable se van a ir alcanzando los distintos MCS para acotar el máximo *throughput* alcanzable.

Lo pasos son los siguientes:

1. Se configuran los equipos para usar canales de 20MHz, 40MHz y 80MHz con el objetivo de caracterizar los equipos.

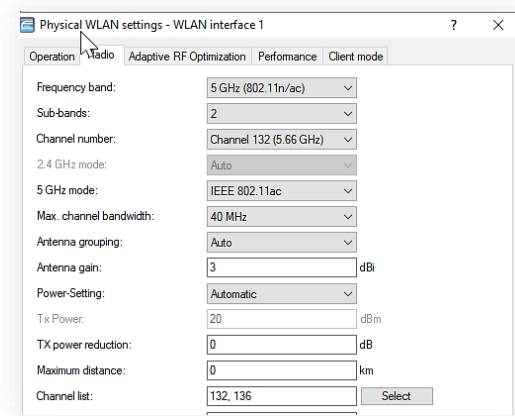


Figura 107 – Cambio de ancho de banda del canal (20,40 u 80 MHz)

2. Se va modificando la atenuación del lado del cliente para poder ir forzando los distintos niveles de MCS.

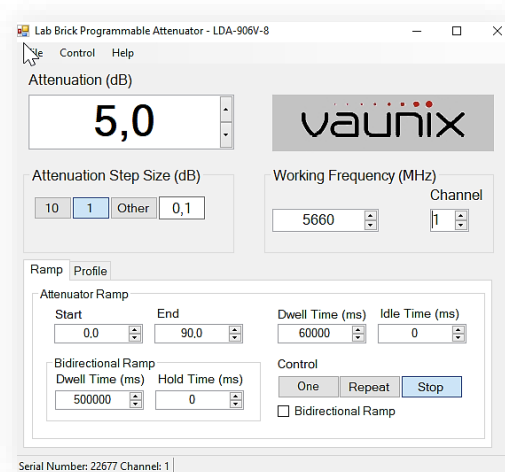


Figura 108 – Software para el manejo del atenuador variable



Esto se observa con la herramienta WLAN del fabricante. En el ejemplo que se muestra a continuación se puede observar que el MCS desde el cliente es 7, velocidad de transmisión (*Tx rate*) 486 Mbps, ancho de banda del canal 40MHz.

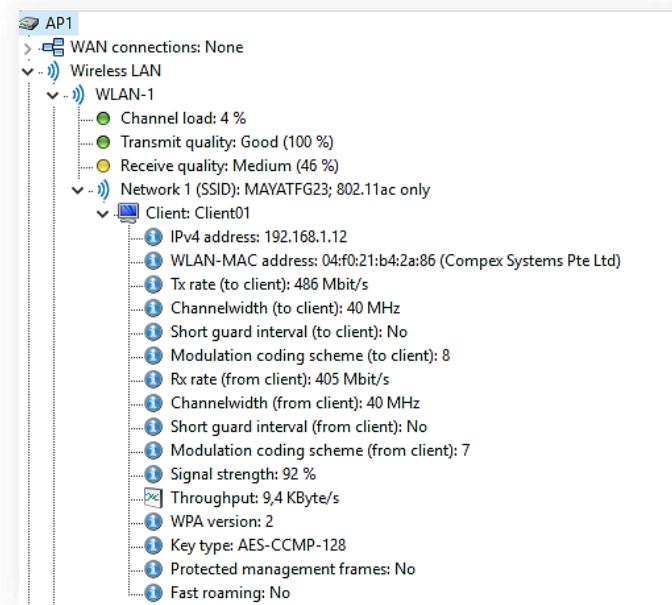


Figura 109 – WLAN Monitor con valores de ejemplo

3. Se comprueba el nivel de señal, ruido y SNR en la web del cliente para ver los valores de asociación con el AP. En este ejemplo se puede observar un nivel de señal de -34dBm, nivel de ruido de -99dBm y un SNR de 65dB. Además, se comprueba que el canal de operación es el 132 por lo que la frecuencia es 5660 MHz.

Station	Address	Signal Level	Noise Level	SNR	Data Rate
AP1	04:f0:21:b4:2b:8c	-31dBm	-100dBm	69dB	VHT-3-234M
Ch 132 (5660 MHz)	locally seen:	-34dBm	-99dBm	65dB	<no data available>

Figura 110 – Valores de asociación con AP1

4. Se envía el máximo tráfico posible en sentido tren-tierra, se han configurado 10 flujos RTP simulando video de 10 clientes (18Mbps \* 10 clientes = 180 Mbps).
5. Se realizará una tabla con los distintos resultados para poder analizarlo (ver apartado 3.2.1).

## 2.10.3. Descripción de pruebas de *throughput* en dinámico (*roaming*)

### 2.10.3.1. Cambios en las configuraciones de los equipos de prueba

Llegados a este punto se utilizan 3 puntos de acceso, y 1 cliente, que tienen que estar configurados para poder ir asociándose, y desasociándose, a los puntos de acceso según el nivel de señal más favorable. Debido a esto, se han llevado a cabo una serie de cambios en la configuración respecto al apartado descrito anteriormente (2.10.2).

- Puntos de acceso:
  - AP1 – canal 100 (5500MHz).
  - AP2 – canal de operación 108 (5540MHz).
  - AP3 – canal de operación 132 (5660MHz).
- Cliente:
  - Roaming activado.
  - Canales de operación 100,104,108,112,132 y 136.

Otro punto importante a remarcar es que se configuran los parámetros de roaming se configuran para las pruebas dinámicas:

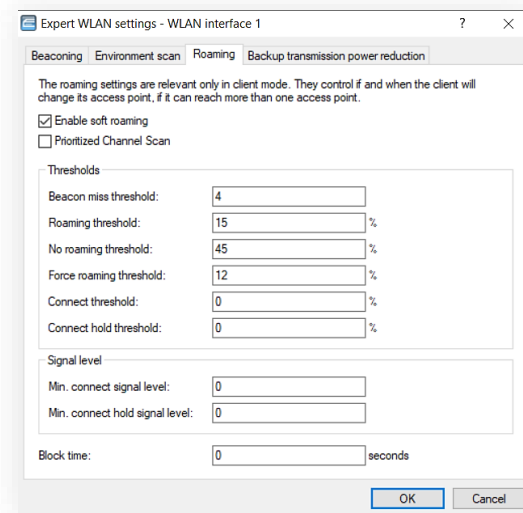


Figura 111 – Pestaña “Expert WLAN settings – Beaconsing” de la configuración

- **Enable soft roaming:** esta funcionalidad desarrollada por el cliente ayuda en la transición de un punto de acceso a otro de una manera más suave y sin cortes de conexión. Tal y como indica el manual si esta opción está deshabilitada la búsqueda en segundo plano, *background scan*, no se realiza por lo que el cliente sólo empieza

a buscar otro punto de acceso cuando la conexión con el actual no es posible. Esto provoca un corte en la conexión ya que se corta la transmisión.

**Es importante** volver a mencionar que sin la modalidad del *softroaming* se ejecutaría un *roaming* normal. Lo que implica que el equipo detiene la transmisión de datos cuando quiere escanear otros puntos de acceso cercanos. Por lo tanto, se experimentaría un corte de transmisión: velocidad de transferencia durante el escaneo de 0Mbps. Con el *softroaming* el equipo escanea sin perder la funcionalidad de transmitir datos. *Esto es la piedra angular del proyecto en cuanto a pruebas roaming: ser capaz de cambiar de punto de acceso sin perder la transmisión de datos.*

- **Beacon miss threshold:** número de *beacons* que el cliente puede perder antes de comenzar a buscar otro punto de acceso. Un valor alto aumenta la probabilidad de no detectar correctamente una pérdida de conexión y, por lo tanto, un retraso en la reconexión. Por el contrario, un valor bajo puede provocar el efecto contrario y detectar un problema de conexión que en realidad no existe. Por defecto el fabricante lo configura a 4.
- **Roaming threshold:** este valor representa, en %, la diferencia en el nivel de la señal (*signal strength*) del punto de acceso escaneado, respecto del actual, para cambiar a él.  
Es decir, cuánto mejor debe ser la señal del punto de acceso escaneado para que el cliente decida cambiar a él y desconectarse del punto de acceso al que está asociado.

El fabricante especifica unos valores de referencia:

- 100% -> 64dB
- 50% -> 32 dB
- 0% -> 0 dB

Por defecto está configurado al 15% (23-24 dB aproximadamente).

- **No roaming threshold:** este es el valor, en %, en el que el cliente debe empezar a escanear en busca de otros puntos de acceso (*soft roaming*). La idea es que a partir de este nivel se pierde potencia de señal recibida por lo que debe encontrar un punto de acceso mejor al que asociarse.
- **Forced roaming threshold:** este valor, en %, indica que el nivel de señal es tan bajo que se hace necesario asociarse a otro punto de acceso de manera forzosa.

Por extensión del documento el detalle de los cambios en la configuración se desplaza al anexo 7.4.

## 2.10.3.2. Cambios en la configuración de la herramienta de medida de *throughput*

Para este apartado se han seguido los mismos pasos explicados en el apartado 2.10.2.1 pero modificando las IPs de los *endpoints* (10.196.2.50 en tren, 10.169.21.28 en tierra) y limitando el *throughput* a un máximo de 150Mbps (15Mbps \* 10 flujos).

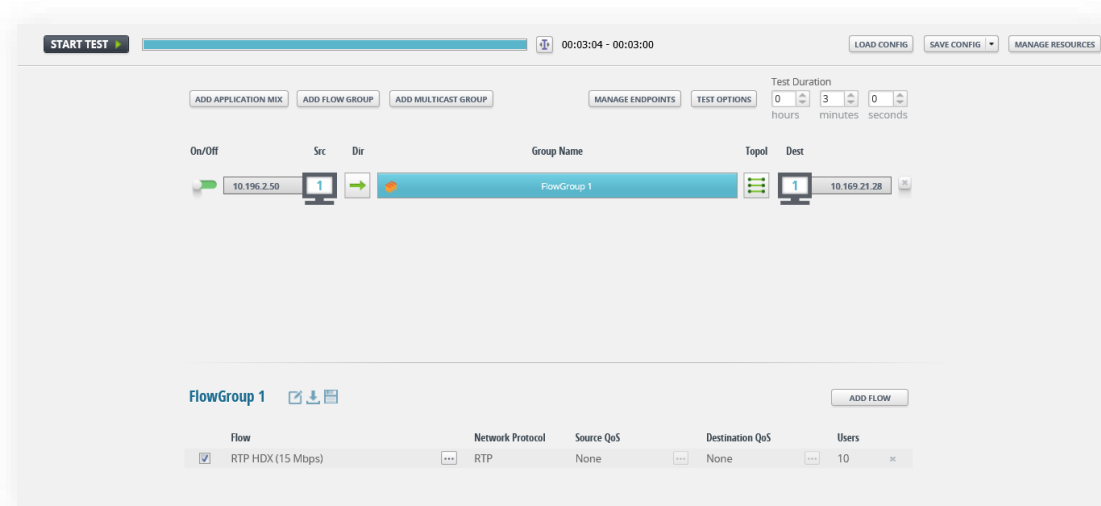


Figura 112 – Configuración de flujos en IxChariot 9.2 para pruebas de roaming

## 2.10.3.3. Procedimiento de pruebas

Para el procedimiento de pruebas se han definido 2 escenarios de velocidad, recordando que AP1 tienes sus antenas conectadas a los puertos 1-4-7 del atenuador, AP2 al 2-5-8 y AP3 solo a los 3-6:

- **Escenario para caracterizar el comportamiento de los equipos, escenario 1:** este escenario va a ser el más utilizado. Es el escenario en el que la funcionalidad de *softroaming* saca el mayor partido.

Se basa en la suposición de que cuando el tren se aleja del AP1, y la señal comienza a reducirse en potencia, se acerca al AP2 y su señal empieza a aumentar. En ese momento empieza el escaneo y el cambio de AP. Esto mismo ocurre con el AP2 -> AP3 con la diferencia de que el AP3 ya no va a cambiar de punto de acceso y la atenuación se mantendrá constante al final de la prueba.

Para poder visualizar los escenarios de una manera más gráfica, se incluye el diagrama de la Figura 113. El eje X indica el número de salto de atenuación y el eje Y indica el nivel de atenuación:

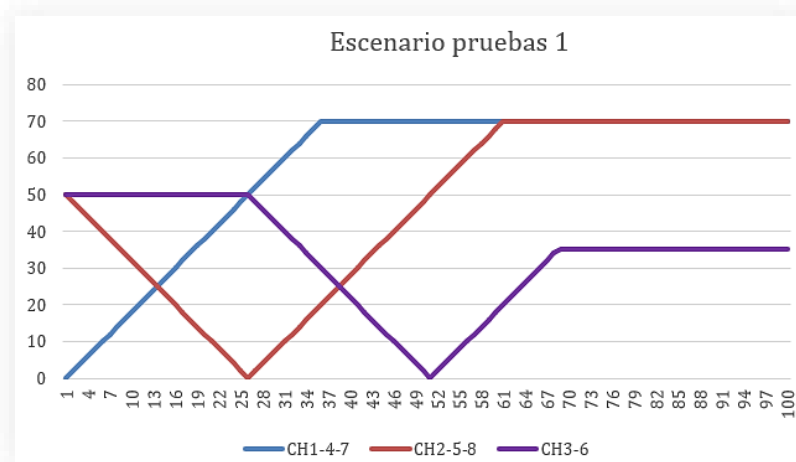


Figura 113 – Diagrama de atenuación de señal en escenario 1

Como se puede observar, AP1 (rampa azul) comienza a aumentar la atenuación de sus antenas y, por tanto, la señal empieza a perder nivel. A 50 dB de atenuación en el AP1, el AP2 (rampa roja) alcanza la atenuación 0 dB, por tanto, su señal es máxima. En ese punto AP1 se mantiene atenuado, a 70 dB, y AP2 empieza a perder nivel de señal. Estas rampas son simétricas en los 3 puntos de acceso por lo que cuando AP2 llega a 50dB de atenuación AP3 (rampa morada) está a 0 dB de atenuación (nivel de señal máxima).

- **Escenario de movimiento acorde a la simulación realizada en el apartado 2.9.1, escenario 2:** en este escenario la suposición es que el cliente no va a recibir señal de los nuevos puntos de acceso hasta que rebasa el siguiente poste de vía, a 350 metros del anterior, por lo que, tal y como se muestra en la Figura 114, las rampas de atenuación son más abruptas (se ha respetado el código de colores del escenario anterior):



Figura 114 – Diagrama de atenuación de señal en escenario 2

En este escenario se puede observar como el nivel de señal del AP2 no aparece hasta que el AP1 ha perdido casi toda la potencia. Como se comprobó en el apartado de la simulación, AP1 alcanza, a la altura del poste del AP2, un nivel de señal de -69/-70dBm y, en ese momento, el cliente comienza a captar la señal de AP2. Este escenario simula ese apantallamiento total de la señal para observar el comportamiento del *roaming* ante este hecho, con la funcionalidad de *softroaming* sigue escaneando sin parar de transmitir. Este no es el escenario ideal para la caracterización de los equipos, pero es que se tendrá en campo.

De todas formas, lo que se busca con este escenario de pruebas es verificar si es viable la instalación, tal y como se ha simulado con el *software* de Ekahau en el apartado 3.1.2.

Por otro lado, se ha definido los valores que se van a configurar en el cliente para las distintas pruebas: en concreto 9 opciones.

Se ha confeccionado una tabla para hacer un mejor seguimiento de las pruebas planteadas:

Tabla 27 – Valores del cliente y escenario de prueba definidos (tes1 al test5)

	Test1 (%)	dB	Signal (dBm)	Test2 (%)	dB	Signal (dBm)	Test3 (%)	dB	Signal (dBm)	Test4 (%)	dB	Signal (dBm)	Test5 (%)	dB	Signal (dBm)
Roaming threshold	15		9,6	8		5,12	8		5,12	8		5,12	8		5,12
No roaming threshold	45	28,8	-71,2	50	32	-68	50	32	-68	55	35,2	-64,8	60	38,4	-61,6
Forced roaming	12	7,68	-92,32	12	7,68	-92,32	41	26,24	-73,76	45	28,8	-71,2	51	32,64	-67,36
	escenario 1			escenario 1			escenario 1			escenario 1			escenario 1		

Tabla 28 – Valores del cliente y escenario de prueba definidos (tes6 al test9)

	Test6 (%)	dB	Signal (dBm)	Test7 (%)	dB	Signal (dBm)	Test8 (%)	dB	Signal (dBm)	Test9 (%)	dB	Signal (dBm)
Roaming threshold	8			8			7		4,48	7		4,48
No roaming threshold	70	44,8	-55,2	78	49,92	-50,08	62	39,68	-60,32	62	39,68	-60,32
Forced roaming	61	39,04	-60,96	61	39,04	-60,96	42	26,88	-73,12	42	26,88	-73,12
	escenario 1			escenario 1			escenario 1			escenario 2		

Tal y como se observa en la (Tabla 27 y Tabla 28) los valores se han definido teniendo en cuenta los niveles de señal en los que el cliente tiene que empezar a escanear y, por lo tanto, encontrar un punto de acceso nuevo con mejor nivel de señal para asociarse a él.

También se indica el nivel de señal al que se va a forzar un salto a un nuevo punto de acceso (*roaming*). Llegados a este punto ninguna de las condiciones marcadas por los parámetros de *threshold* se han cumplido, por lo que, como el cliente no ha podido decidir asociarse a un nuevo AP, la decisión debe ser forzada.

Estos datos se explicaron en profundidad en el apartado 7.4.1.1, no obstante, se expone un ejemplo concreto:

Tabla 29 – Valores definidos para el Test1

	Test1 (%)	dB	Signal (dBm)
Roaming threshold	15	9,6	
No roaming threshold	45	28,8	-71,2
Forced roaming	12	7,68	-92,32
escenario 1			

- El parámetro **roaming threshold** está definido a **15%**, esto son 9,6dB, este valor indica que el nivel de señal del punto de acceso escaneado debe ser 9,6dB mejor, nivel de señal más alto, que el valor del punto de acceso al que está asociado el cliente.
- El parámetro **no roaming threshold** está definido como un **45%**, 28,8 dB, por lo que la señal debe ser -71,2 dBm para empezar con el escaneo en segundo plano, *background scan*. Esto se ha calculado con un ruido de -100 dBm que existirá en el laboratorio [28,8 dB + (-100 dBm) = -71,2 dBm]. Un dato importante es que si el nivel de ruido variase habría que recalcular este valor de %.
- El parámetro **forced roaming** está configurado a **12%**, esto son 7,68 dB por lo que, siguiendo el cálculo planteado en el parámetro anterior, esto indica que el equipo se asociará a un nuevo AP llegado al nivel de señal -92,32 dBm. Se asume que siempre el punto de acceso al que el cliente está asociado será peor que el nuevo escaneado.

Por último, se han comprobado el nivel de señal recibido en el cliente aplicando las distintas atenuaciones a los puntos de acceso:

- 0 dB --> -27dBm


Station	Address	Signal Level	Noise Level	SNR
 AP01	04:f0:21:b4:2b:8a	-27dBm	-101dBm	74dB
Ch 132 (5660 MHz)	locally seen:	-22dBm	-101dBm	79dB

Figura 115 – Nivel de señal, nivel de ruido y SNR con atenuación 0dB

- 10 dB --> -37 dBm
- 20 dB --> -47 dBm
- 30 dB --> -57 dBm
- 40 dB --> -67 dBm
- 50 dB --> -77 dBm
- 60 dB --> -85 dBm
- 70 dB --> -95 dBm-desasociado

Una vez explicado todo lo anterior se procede a explicar, paso por paso, la manera en la que se van a desarrollar las pruebas:



1. Se configura los parámetros de *roaming*, en el cliente, de acuerdo a los valores establecidos en la Tabla 27 o Tabla 29, dependiendo el número de *test*.
2. Se cargan los perfiles de atenuación, de acuerdo con el número de escenario a probar, en el programa de control del atenuador variable “VAUNIX”. Al cargar los ficheros con los datos de atenuación se observa la gráfica de escalones (*Attenuation profile*). Además, se configura el tiempo que tarda el programa de saltar de 1 escalón a otro (*dwell time*). Este tiempo se establece en 3 segundos (3000 ms) para el escenario 1 y 2 segundos (2000 ms) para el escenario 2.
  - a. Rampas en el escenario 1:

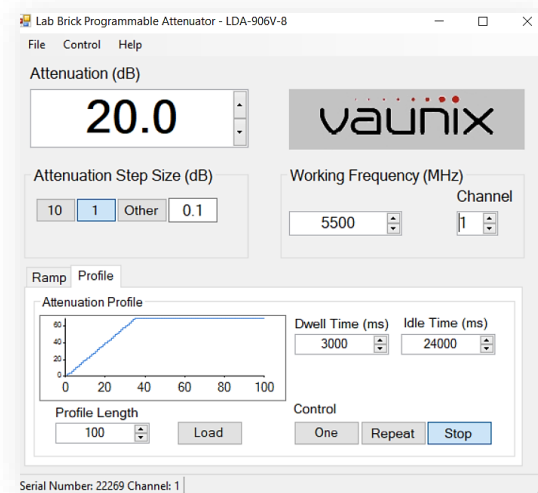


Figura 116 – Rampa de atenuación del escenario 1 (CH1-3-7)

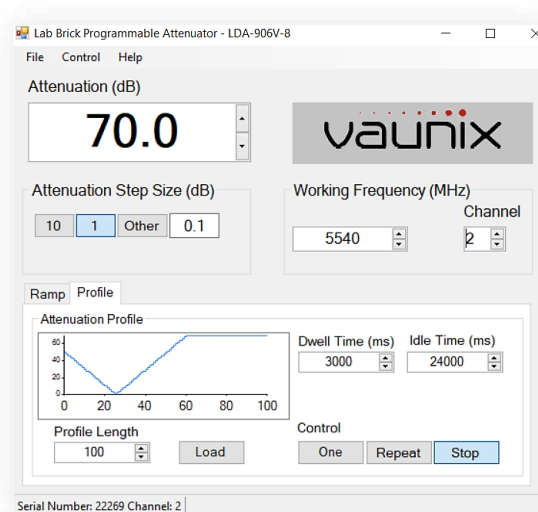


Figura 117 – Rampa de atenuación del escenario 1 (CH2-4-8)

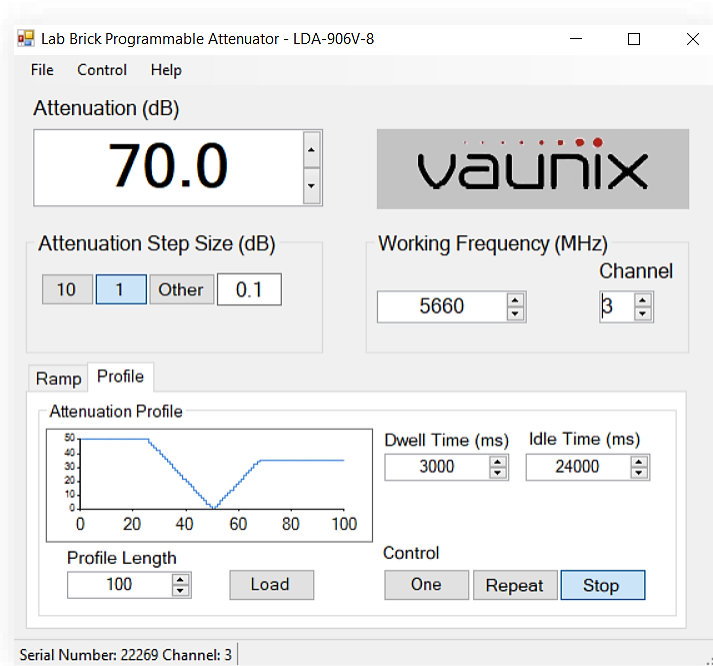


Figura 118 – Rampa de atenuación del escenario 1 (CH3-6)

Estas rampas concuerdan con los datos reflejados en el diagrama de la Figura 113.

b. Rampas en el escenario 2:

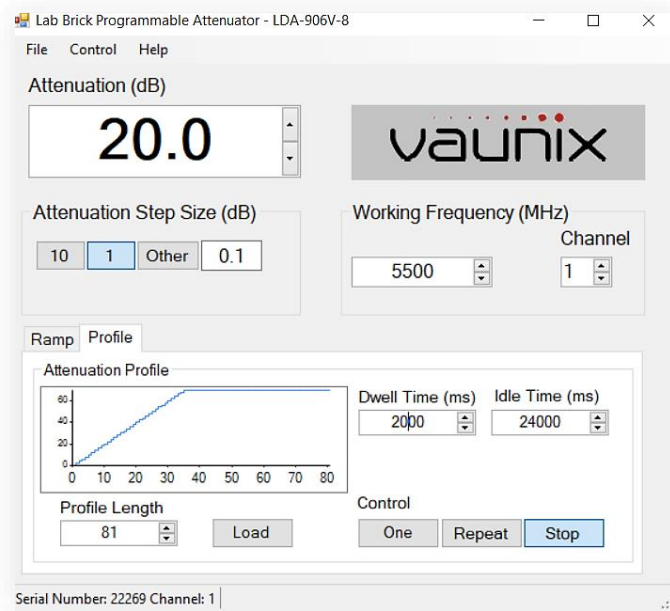


Figura 119 – Rampa de atenuación del escenario 2 (CH1-3-7)

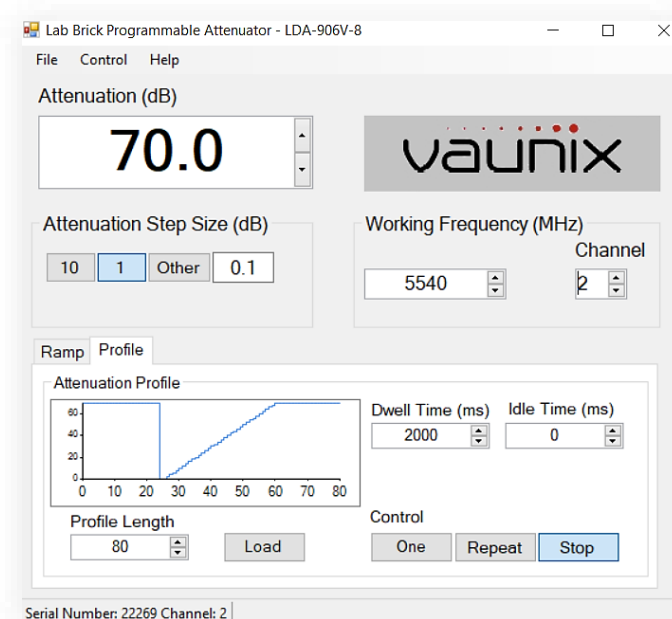


Figura 120 – Rampa de atenuación del escenario 2 (CH2-5-8)

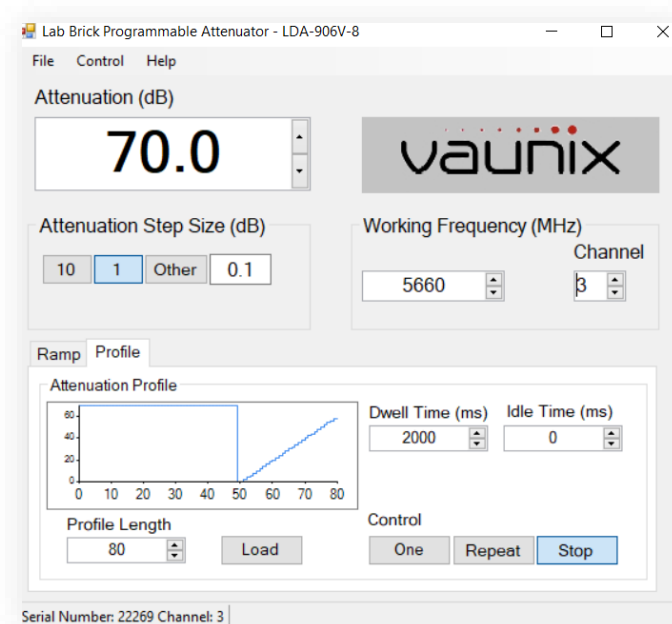


Figura 121 – Rampa de atenuación del escenario 2 (CH3-6)

Estas rampas concuerdan con los datos reflejados en el diagrama de la Figura 114.

3. Se configura la frecuencia en la que se va a aplicar la atenuación (*working frequency*):
  - a. 5500MHz para los canales 1, 4 y 7.
  - b. 5540MHz para los canales 2, 5 y 8.
  - c. 5660MHz para los canales 3 y 6.

4. Una vez que se tiene configurado el atenuador hay que conectarse a la web de la aplicación de Ixia para las pruebas de *throughput*. El sistema de pruebas está configurado, tal y como se ha descrito en el apartado 2.10.3.2.
5. Comienzan las pruebas, pulsando en el botón *start* de la sesión de Ixia.
6. Una vez comienza a medir la tasa de transferencia se pulsa en el botón *start* de cada canal para comenzar a utilizar las rampas del escenario.
7. Se ha calculado la duración del test de Ixia teniendo en cuenta la duración de los ficheros de atenuación:
  - a. Escenario 1: 100 escalones \* 3 segundos = 5 minutos, se configura a 4 minutos y 30 segundos ya que la parte final de los escalones es el AP3 con atenuación de 35dB.
  - b. Escenario 2: 80 escalones \* 2 segundos = 2,6 minutos, se configura a 3 minutos de duración.
8. Una vez finalizado el test se procede a exportar el gráfico de *throughput* para aportarlo a los resultados del apartado 3.2.2.

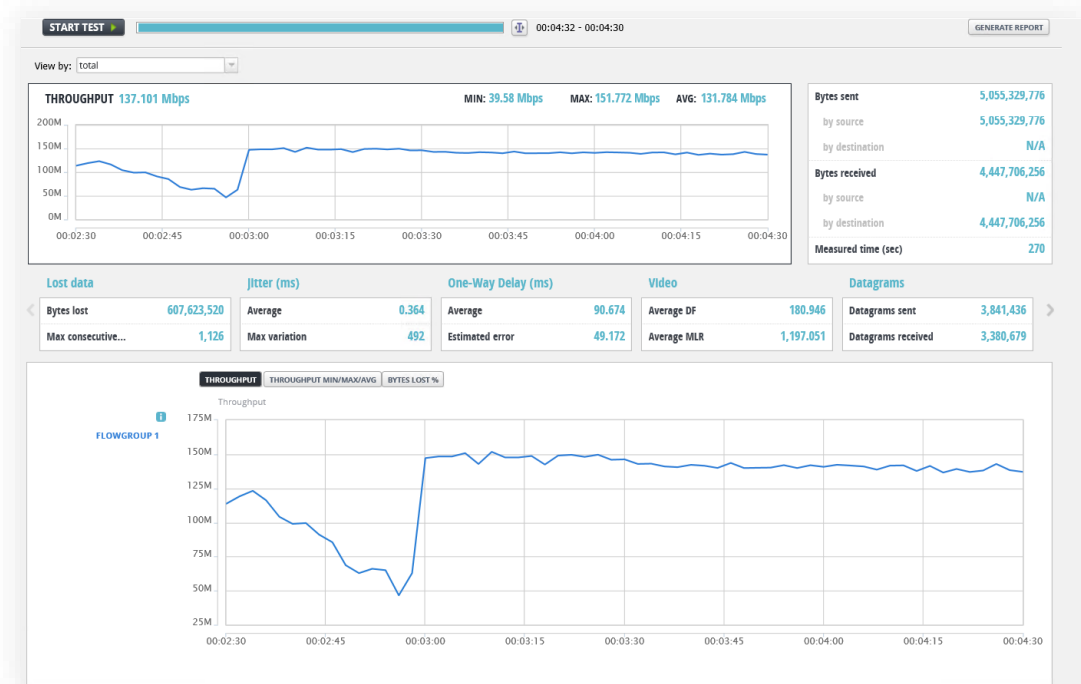


Figura 122 – Pantalla con la finalización del test de Ixia (ejemplo)

## 2.10.4. Descripción de la prueba final para descarga de grabaciones tren-tierra

Para esta prueba final se ha utilizado la misma plataforma que se ha configurado para las pruebas de *roaming* (ver Figura 98). Para caracterizar el sistema se ha modificado el atenuador para que el cliente se conecte al AP con el máximo de señal (0dB de atenuación) y en estático.

Se ha instalado, tanto en el PC embarcado como en el de tierra, la plataforma de Genetec (Security Center 5.11) con una licencia demo.

Una vez instalada, se ha preparado un simulador de cámaras de video (rtp) para emular los ficheros de grabación y poder descargarlos en tierra.

En este caso la arquitectura de Genetec funciona de la siguiente manera:

- Laptop de Tierra (endpoint 2): se instala como servidor principal, también llamado *Directory*. Este es el núcleo del sistema y funciona como punto central de administración. También se ha instalado un *role* llamado *Archiver-Emb* que será el que almacene las grabaciones descargadas.
- Laptop Embarcado (endpoint 1): en el lado del tren se ha instalado la aplicación en modo servidor de expansión es en este equipo donde se ha creado un *role* llamada *Archiver-Tren* y almacena las grabaciones del emulador de video.

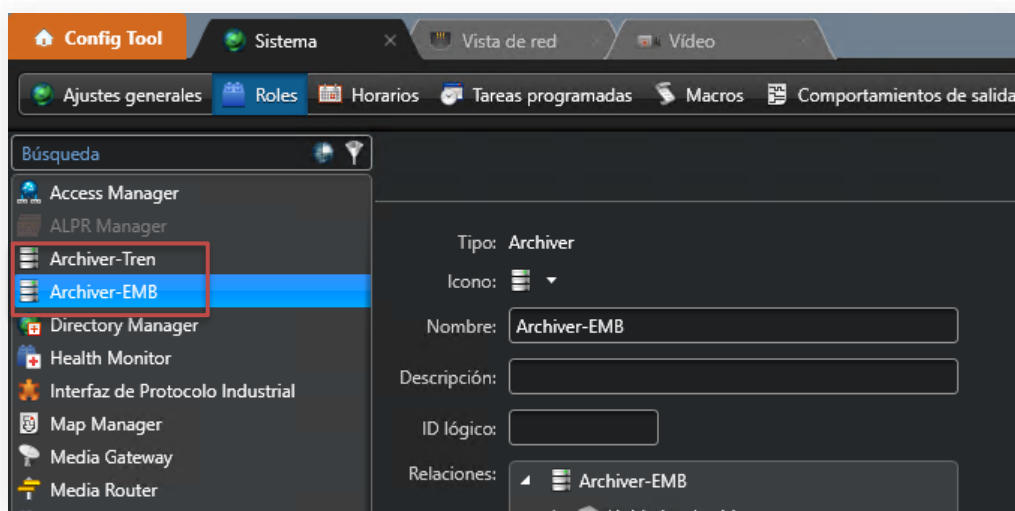


Figura 123 – Grabadores de tierra y tren configurados

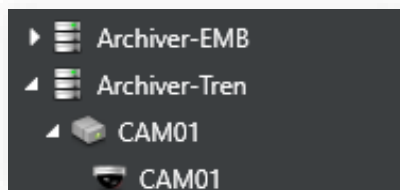


Figura 124 – Cámara del tren emulada y configurada

- Una vez que los grabadores y sus *roles* están preparados hay que crear una tarea de descarga de grabaciones y pulsar el botón de iniciar para ver el nivel de transferencia que alcanza el sistema. Por lo que, como estado final, el sistema copiará los ficheros almacenados en el *laptop* embarcado y los copiará al Laptop Tierra.

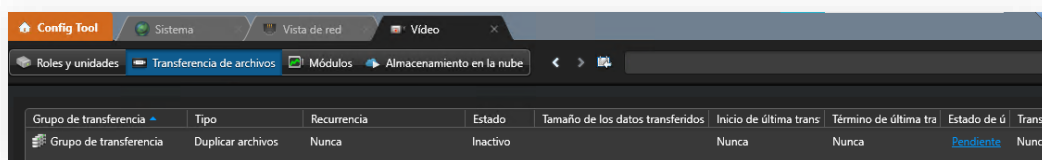


Figura 125 – Tarea de descarga de grabaciones preparada

- Consultando el equipo embarcado (*laptop* embarcado o *endpoint 1*) se puede comprobar que el sistema ya está almacenando el video de la cámara en el disco duro:

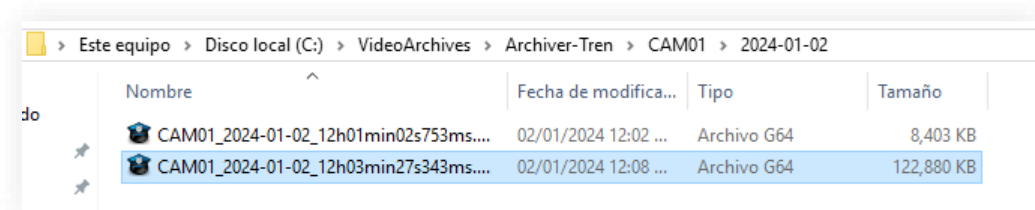


Figura 126 – Fichero de grabación en disco duro del grabador embarcado

- Con esto el sistema ya está preparado para la prueba final. Los resultados de esta prueba se recogen en el apartado **3.2.3**.

## 3. Resultados

### 3.1. Pruebas simuladas por software

#### 3.1.1. Estudio de cobertura Talleres y Depósitos

En la simulación se han colocado los puntos de acceso en los extremos de la zona en la que se quiere proporcionar la cobertura suficiente para alcanzar la velocidad de transferencia esperada, en este caso, y aunque existe un requisito de 100Mbps, se quiere alcanzar la máxima posible para la tecnología bajo estudiado.

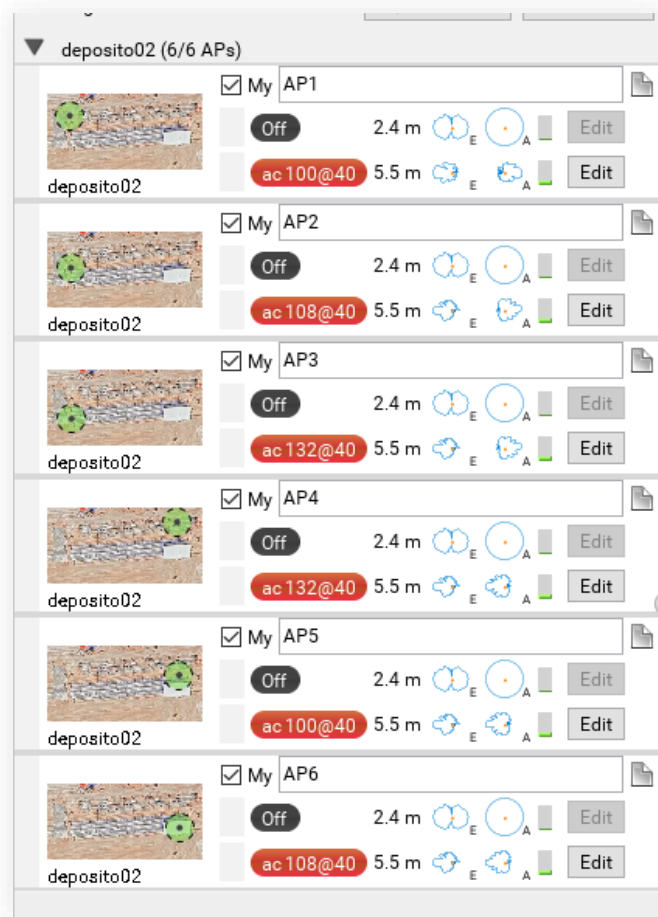


Figura 127 – Valores configurados para los puntos de acceso (resumen)

Una vez configurada la simulación, se procede a enunciar los datos obtenidos.



### 3.1.1.1. Nivel de señal

En cuanto a nivel de señal (nivel de potencia de la señal inalámbrica) en el receptor, se observa que a 100 metros (aproximadamente) de los puntos de acceso, zona que marcaría la mitad aproximada del depósito:

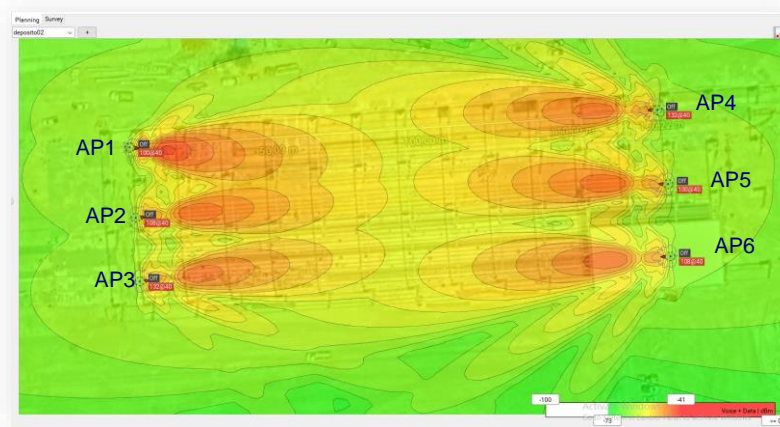


Figura 128 – Simulación Depósito – Niveles de señal

Colocando el cursor en medio de la primera fila de trenes, se puede observar que existe un nivel de señal de  $-57\text{dBm}$ , por lo tanto, se obtiene una cobertura suficiente en toda la zona.

Si este valor es comparado con los indicados por el fabricante, en la Tabla 20, se cumple que el nivel de señal recibido es suficiente para el especificado por el fabricante para un *coding* MCS9:  $-67\text{dBm}$ . Se debe seguir revisando los resultados para descubrir qué SNR existe en la zona y relacionar los resultados de la simulación con los datos del fabricante.

Además, se cubren ambos extremos con puntos de acceso. En consecuencia, se diseña el sistema para que puedan existir varios clientes (trenes) en la misma zona y dar servicio desde distintos APs.

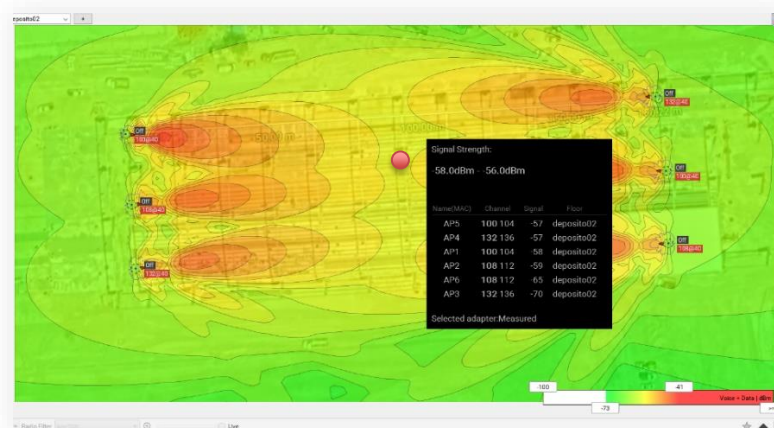


Figura 129 – Simulación depósito – Niveles de señal en zona media

### 3.1.1.2. Interferencias

Se ha decidido la selección de canales en cada AP con una separación suficiente para disminuir el impacto de las interferencias.

Tabla 30 – Configuración de canales por AP

AP1 – 100	AP4 – 132
AP2 – 108	AP5 – 100
AP3 – 132	AP6 – 108

El nivel de ruido indica la cantidad de ruido de fondo que interfiere en el entorno. Con un nivel de ruido muy alto, el nivel de señal y el desempeño de los equipos se verán degradados. El nivel de ruido se mide en dBm y la escala es de 0 a -100, cuanto más cercano a cero más potente es el ruido y, por tanto, se tendrán peores resultados en el sistema (interferencias).

Con la configuración de canales vistos en la Tabla 30, se consiguen los siguientes resultados:

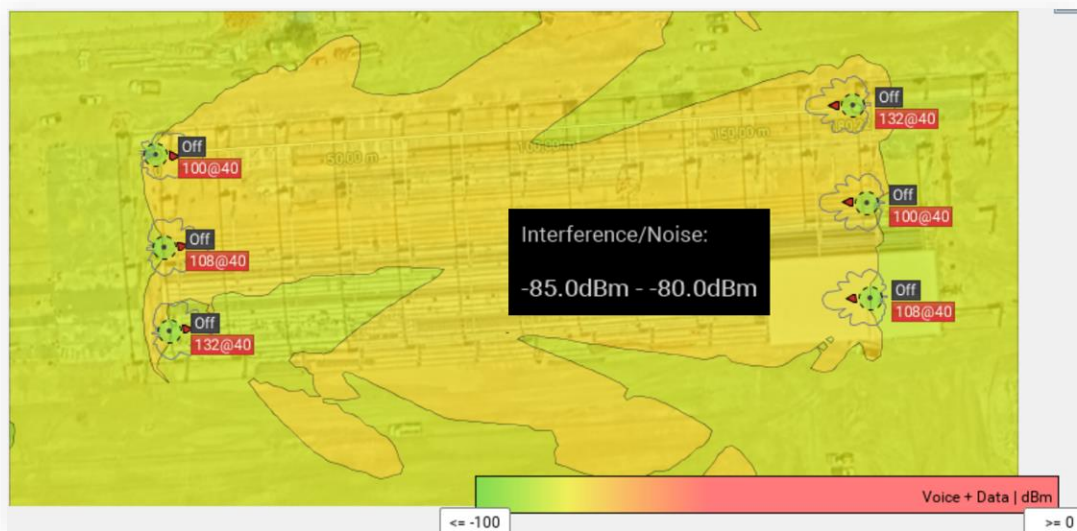


Figura 130 – Simulación Depósito - Niveles de ruido en zona media

Como se puede observar en la Figura 130, el nivel de ruido en la zona muestra unos valores desde -80/-85 dBm (zona amarilla) a -90 dBm (zona verde cercana al AP3 y AP4). Esto muestra que las condiciones de la zona son bastante aceptables. Teniendo en cuenta que se trata de una zona al aire libre, donde no se esperan otros sistemas interferentes, estas interferencias/ruido son generadas por los propios equipos.

Otro de los factores relevantes al nivel de señal respecto al ruido es el SNR (*Signal to Noise Ratio*):

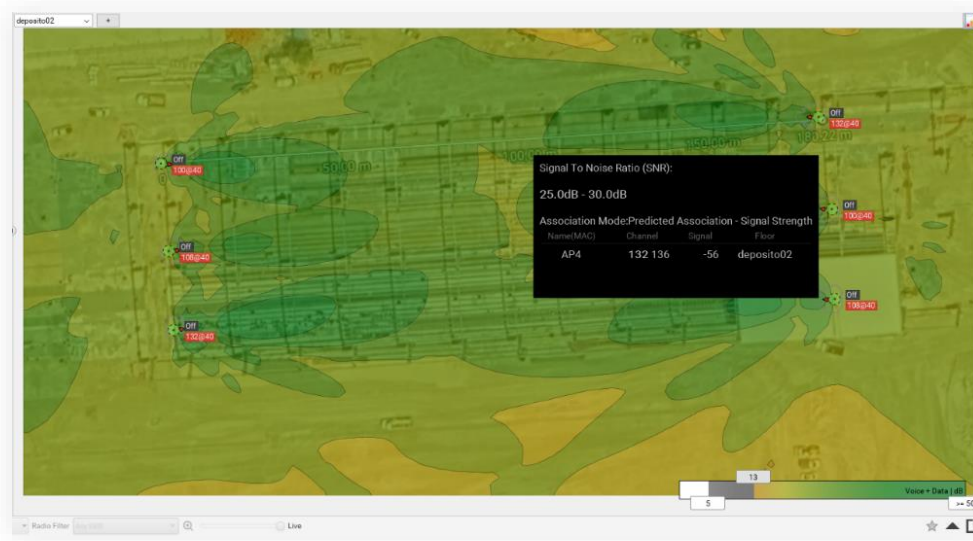


Figura 131 – Simulación Depósito - SNR en zona media

El SNR es la relación de potencia que existe entre el nivel de la señal y el nivel de ruido. Regresando a los valores de la Tabla 21, se necesita un SNR de +25 dBm para un buen desempeño y velocidad del sistema. En la Figura 131 se puede observar que el peor SNR está entre 25 y 30 dBm, por lo tanto, no se observan problemas de desempeño en la señal del sistema y los valores marcados por el fabricante.

### 3.1.1.3. Data Rate

Por último, el parámetro a comentar es el *data rate*, este dato indica la velocidad de transferencia máxima que le sistema puede alcanzar a nivel radio. Los resultados obtenidos al respecto son:

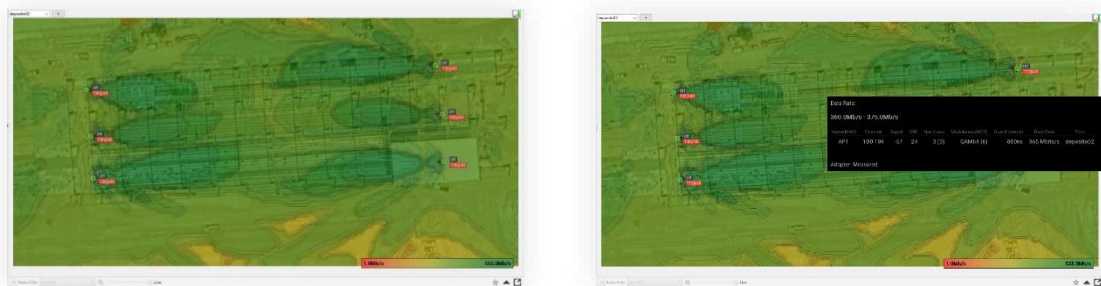


Figura 132 – Simulación Depósito - Data Rate vista general

En este caso simulado, el *data rate* tiene unos valores que van desde 555Mbps en las zonas más cercanas a los APs (zona verde oscura) a 360Mbps en las zonas (verde clara). Por lo tanto, en este caso, el sistema también cumple con los requisitos marcados.



### 3.1.2. Estudio de cobertura en Vía

Para este estudio se ha tenido en cuenta una distancia de 1 km de vía, ya que una vez estudiada esta zona es ampliable al resto de la línea (caracterización del comportamiento en vía).

Las referencias que se han tomado son las que se muestran en la Figura 133, esto es 1 km de vía (línea roja) y los 3 APs separados entre sí a 350 metros de distancia (líneas azules), respetando la decisión y criterios expuestos en el apartado **2.8**.



Figura 133 – Setup de la zona de pruebas en vía

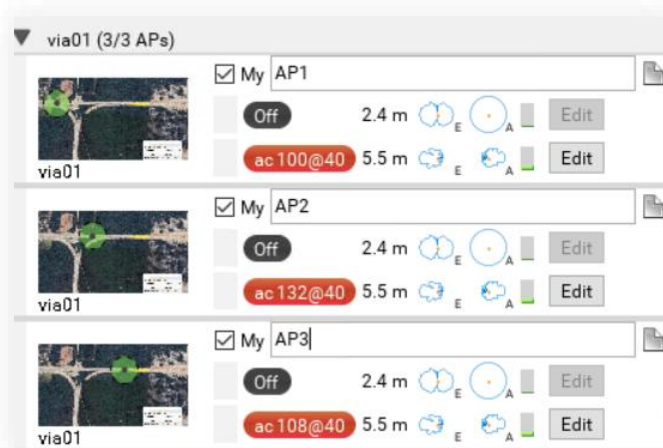


Figura 134 – APs configurados para simulación de vía

Una vez que se tiene clara la configuración a simular se obtienen los siguientes resultados.

### 3.1.2.1. Nivel de señal

Como se puede observar en la Figura 136, el nivel de señal del AP1, que alcanza el poste donde del AP2, es de -65/-70 dBm. Por lo tanto, este valor, comparado con el de la Tabla 22 del apartado 2.8, cumple con el resultado (-67dBm).

La simulación de este escenario indica que el criterio de un AP cada 350 metros es adecuado y que los valores previos calculados son correctos. Esto implica que la decisión de incluir 9 dB extra de atenuación ha sido correcto.

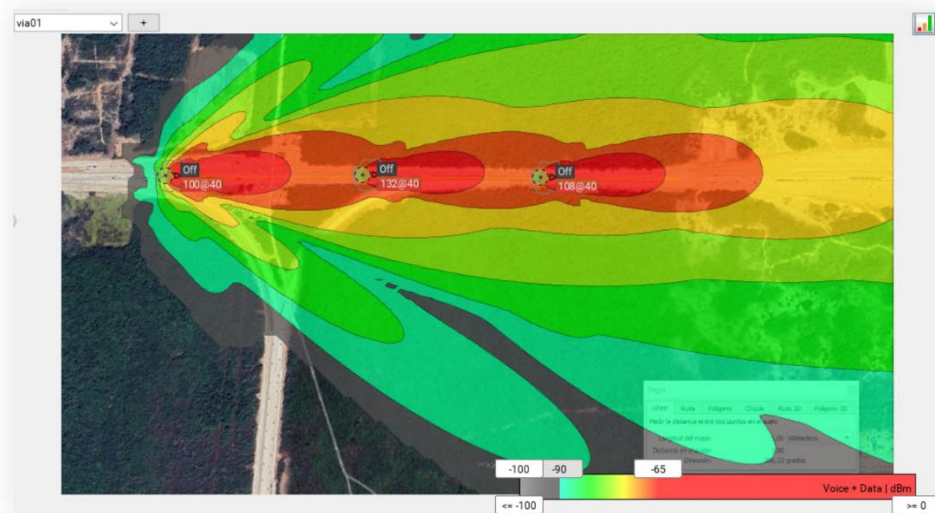


Figura 135 – Simulación vía – nivel de señal (vista general)

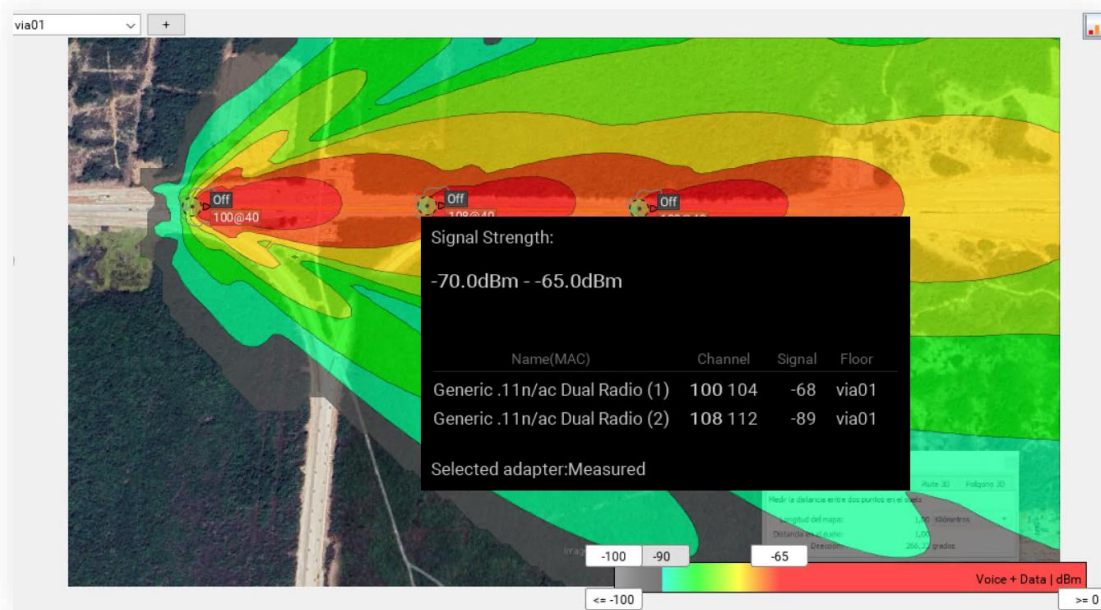


Figura 136 – Simulación vía – nivel de señal a 350 metros del AP

### 3.1.2.2. Interferencias

Otro de los datos importantes, ya remarcado en la simulación en depósito, es el nivel de interferencia entre puntos de acceso. Con esta simulación se ha tenido en cuenta 2 factores importantes:

- **Distribución de canales.** Se dispone de los canales 100, 108 y 132. Por tanto, hay que hacer un uso correcto y aprovechar la separación de estos para reducir las interferencias entre ellos.
- **Alcance de la señal por la orientación de las antenas:** en este caso todas las antenas estarían orientadas en la misma dirección y sentido. Esto implica que el lóbulo trasero captaría muy poco nivel de señal del AP anterior. Con esto se garantiza la reducción de interferencias y ruido.

Como se puede observar en la Figura 137, el nivel de ruido esperado es muy bajo:

- -94/-90 dBm en la zona verde (AP1 y AP2).
- -90/-85 dBm en la zona amarilla (AP3 hacia la estación).

En el último AP se observa mayor nivel de ruido. Esto es debido a que los canales están dispuestos en el orden 100, 108 y 132, en AP1, AP2 y AP3 respectivamente.



Figura 137 – Simulación vía – nivel de interferencia/ruido

Al cambiar el orden de los canales (100, 132 y 108) se reducen las interferencias cercanas al AP3 y se consigue que toda la zona esté marcada en verde (-94/-90dBm de ruido), ver la Figura 138.





Figura 138 – Simulación vía – nivel de interferencia/ruido (mejor disposición de canales)

Ahora se contempla el mejor escenario posible en cuanto a la reducción de interferencias/ruido en la zona producidas por los propios APs.

Los datos de SNR obtenidos en la simulación abarcan de 20/25dB. Si se analiza la Figura 139:



Figura 139 – Simulación vía – SNR

Los datos de SNR en vía obtenidos en la simulación cumplen los recogidos en la Tabla 21 (SNR:25dB) a excepción de los últimos 50 metros (zona gris).

En este caso se haría una prueba en campo (*site survey*) para comprobar el desempeño real del sistema. Si se observaran problemas en campo, se tomarán medidas para mitigar este efecto: acercar los APs esos 50 metros o introducir una segunda antena orientada en sentido contrario (2 antenas 3x3 por AP). También es posible que, en esos 50 metros, la velocidad de transferencia no se vea afectada por completo y, por tanto, no exista una interrupción en la transferencia.



### 3.1.2.3. Data Rate

Por último, uno de los puntos más importantes, y por lo que se ha realizado la simulación, es el nivel de *date rate* máximo alcanzado en la zona.

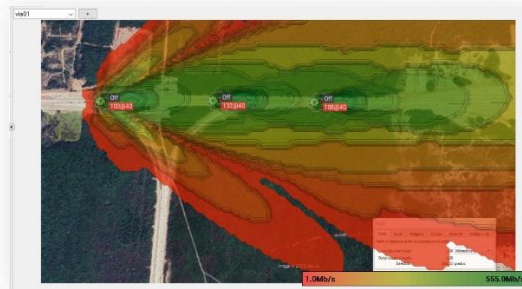


Figura 140 – Simulación vía – Data Rate (vista general)

Como se puede comprobar en la Figura 141 el dato obtenido para esta simulación es 360/375 Mbps:

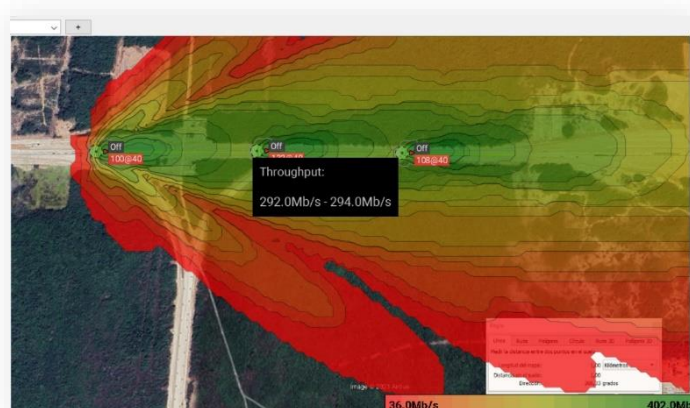
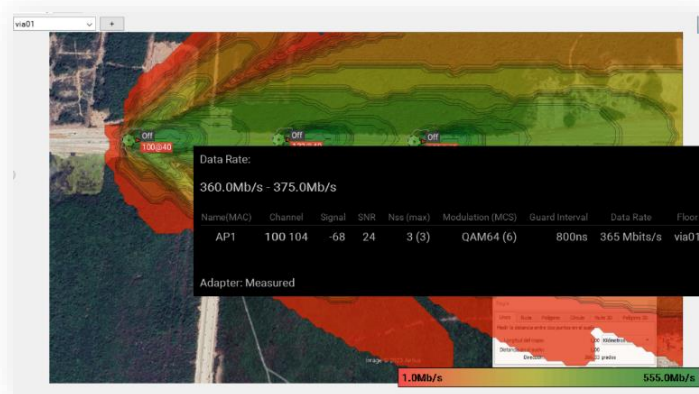


Figura 141 – Simulación vía – Data Rate a 350 metros del AP

Por lo que el requisito también estaría cubierto (100Mbps, ver apartado 2.7.1).

## 3.2. Pruebas en laboratorio

### 3.2.1. Resultado sobre pruebas de *throughput* en estático

A continuación, se muestra la primera medida con los resultados, y pantallas obtenidas, al finalizar la misma. En este caso, la primera prueba corresponde a una configuración de canales con un ancho de banda de 20MHz y un nivel de señal en el receptor de -40dBm. Con estas condiciones los equipos negocian un *coding* MCS9:

Tabla 31 – Tabla de datos del cliente para MCS9 20MHz

Atenuación	0 dB
Nivel de señal	-40dBm
Nivel de Ruido	-99dBm
SNR	59dB
MCS negociado en cliente	9
Data Rate	260 Mbit/s

Con estos datos el *throughput* conseguido es: mínimo 110Mbps, máximo 161Mbps y una media de **153 Mbps**, ver Figura 142.

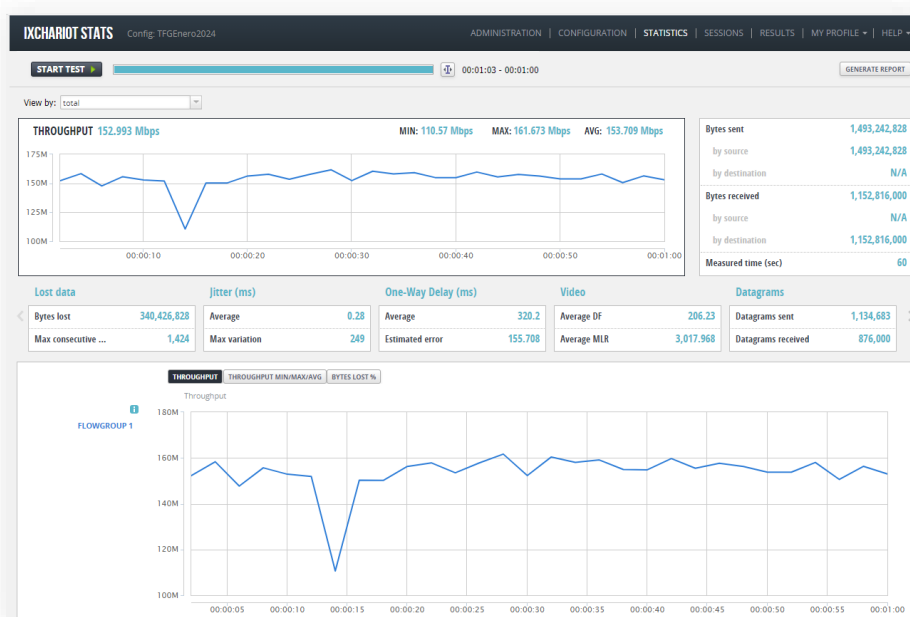


Figura 142 – Valores de *throughput* MCS9 20MHz

El resto de detalle de las pruebas, por extensión del documento, se han desplazado al anexo 7.3.

A continuación, se muestra una tabla resumen de resultados obtenidos:

Tabla 32 – Tabla de resultados pruebas estáticas (20MHz)

			Velocidad de transferencia	
MCS9	Atenuación	0 dB	Máxima	161Mbps
	Nivel de señal	-40dBm		
	Nivel de Ruido	-99dBm	Minima	110Mbps
	SNR	59dB		
	MCS negociado en cliente	9	Media	153Mbps
	Data Rate	260 Mbit/s		
MCS8	Atenuación	10 dB	Máxima	158Mbps
	Nivel de señal	-50 dBm		
	Nivel de Ruido	-98 dBm	Minima	97Mbps
	SNR	48 dB		
	MCS negociado en cliente	8	Media	144Mbps
	Data Rate	234 Mbit/s		
MCS6	Atenuación	20 dB	Máxima	121Mbps
	Nivel de señal	-60 dBm		
	Nivel de Ruido	-99 dBm	Minima	105Mbps
	SNR	39 dB		
	MCS negociado en cliente	6	Media	119Mbps
	Data Rate	175 Mbit/s		
MCS4	Atenuación	30 dB	Máxima	90Mbps
	Nivel de señal	-69 dBm		
	Nivel de Ruido	-100 dBm	Minima	82Mbps
	SNR	31 dB		
	MCS negociado en cliente	4	Media	88Mbps
	Data Rate	117 Mbit/s		
MCS2	Atenuación	40 dB	Máxima	46Mbps
	Nivel de señal	-72 dBm		
	Nivel de Ruido	-100 dBm	Minima	37Mbps
	SNR	27 dB		
	MCS negociado en cliente	2	Media	45Mbps
	Data Rate	117 Mbit/s		

Tabla 33 – Tabla de resultados pruebas estáticas (40MHz)

			Velocidad de transferencia	
MCS9	Atenuación	0 dB	Máxima	172Mbps
	Nivel de señal	-43dBm		
	Nivel de Ruido	-98dBm	Minima	111Mbps
	SNR	55dB		
	MCS negociado en cliente	9	Media	159Mbps
	Data Rate	260 Mbit/s		
MCS8	Atenuación	10 dB	Máxima	161Mbps
	Nivel de señal	-54dBm		
	Nivel de Ruido	-100dBm	Minima	135Mbps
	SNR	46 dB		
	MCS negociado en cliente	8	Media	148Mbps
	Data Rate	234 Mbit/s		
MCS6	Atenuación	20 dB	Máxima	161Mbps
	Nivel de señal	-60dBm		
	Nivel de Ruido	-100dBm	Minima	132Mbps
	SNR	40 dB		
	MCS negociado en cliente	6	Media	155Mbps
	Data Rate	175 Mbit/s		
MCS4	Atenuación	30 dB	Máxima	168Mbps
	Nivel de señal	-69dBm		
	Nivel de Ruido	-100dBm	Minima	132Mbps
	SNR	31 dB		
	MCS negociado en cliente	4	Media	162Mbps
	Data Rate	117 Mbit/s		
MCS2	Atenuación	40 dB	Máxima	98Mbps
	Nivel de señal	-76dBm		
	Nivel de Ruido	-102dBm	Minima	76Mbps
	SNR	26 dB		
	MCS negociado en cliente	2	Media	96Mbps
	Data Rate	58,5 Mbit/s		

Tabla 34 – Tabla de resultados pruebas estáticas (80MHz)

			Velocidad de transferencia	
MCS9	Atenuación	0 dB	Máxima	192Mbps
	Nivel de señal	-40dBm		
	Nivel de Ruido	-101dBm	Mínima	8Mbps
	SNR	61dB		
	MCS negociado en cliente	9	Media	152Mbps
	Data Rate	1170 Mbit/s		
MCS8	Atenuación	10 dB	Máxima	194Mbps
	Nivel de señal	-50dBm		
	Nivel de Ruido	-101dBm	Mínima	135Mbps
	SNR	51dB		
	MCS negociado en cliente	8	Media	168Mbps
	Data Rate	1053 Mbit/s		
MCS6	Atenuación	20 dB	Máxima	188Mbps
	Nivel de señal	-58dBm		
	Nivel de Ruido	-101dBm	Mínima	172Mbps
	SNR	43dB		
	MCS negociado en cliente	6	Media	143Mbps
	Data Rate	877 Mbit/s		
MCS4	Atenuación	30 dB	Máxima	179Mbps
	Nivel de señal	-69dBm		
	Nivel de Ruido	-100dBm	Mínima	164Mbps
	SNR	31dB		
	MCS negociado en cliente	4	Media	174Mbps
	Data Rate	526 Mbit/s		
MCS2	Atenuación	40 dB	Máxima	183Mbps
	Nivel de señal	-78dBm		
	Nivel de Ruido	-101dBm	Mínima	152Mbps
	SNR	23dB		
	MCS negociado en cliente	2	Media	170Mbps
	Data Rate	263 Mbit/s		

**Nota:** Durante las pruebas de MCS9 en canales de 80MHz, se produjo un desvanecimiento de la señal y, por ello, se obtuvo un mínimo de 8Mbps. Con canales de 80MHz se alcanzan máximos de 190Mbps, pero la media sigue en valores similares a los alcanzados en canales de 40MHz y 20MHz (140-160Mbps).

En el siguiente apartado se mostrarán las conclusiones para estas pruebas.

### 3.2.1.1. Conclusiones de las pruebas estáticas

Observando los resultados se obtienen las siguientes conclusiones:

1. La única configuración en la que se observa un crecimiento considerable de la velocidad de transferencia, respecto al *coding* MCS negociado, es en la de canales de 20MHz de BW (*bandwidth*).

Tabla 35 – Tabla resumen con el throughput en Mbps obtenidos en las pruebas estáticas

Valores medios			20 MHz	40MHz	80 MHz
MCS9	Nivel de señal	-40dBm	161 Mbps	172Mbps	192Mbps
	SNR	59dB			
MCS8	Nivel de señal	-50dBm	158Mbps	161Mbps	194Mbps
	SNR	48dB			
MCS6	Nivel de señal	-60dBm	121Mbps	161Mbps	188Mbps
	SNR	39dB			
MCS4	Nivel de señal	-69dBm	90Mbps	168Mbps	179Mbps
	SNR	31dB			
MCS2	Nivel de señal	-72dBm	45Mbps	98Mbps	183Mbps
	SNR	27dB			

2. En los canales de 40MHz y 80MHz, se llega a un punto donde la velocidad de transferencia ya no aumenta, aunque la modulación cambie.
  - Ese resultado se contrastó con el fabricante y la respuesta fue que existe una limitación de la CPU. Por lo tanto, llega un punto que la velocidad no se puede incrementar por mucho que las condiciones de radio sean óptimas.
3. La velocidad de transferencia es superior a los 100Mbps en casi todos los escenarios.
  - En el caso de los -72dBm/27dB del MCS2 de 40 MHz alcanzaría los 100Mbps de una manera muy justa pero aceptable y validaría el equipo para esta aplicación.
4. Si se comparan los resultados de la Tabla 35 con los valores especificados por el fabricante, Tabla 16, Tabla 20 y Tabla 23, se observa que difieren bastante de los resultados obtenidos.
  - En el caso de la Tabla 20 el fabricante indicaba una negociación de *coding* MCS9 a -67dBm, sin embargo, con -69 dBm el MCS negociado por el equipo es MCS4 (en laboratorio).
  - El MCS4 se alcanza con un nivel de señal de -69dBm (pruebas en laboratorio) pero producto indica que se necesitan unos -79dBm para este MCS.

Tabla 36 – Detalle de los valores de producto para canales de 40MHz

MCS 4	22 dBm	-79 dBm
MCS 9	18 dBm	-67 dBm

5. Se observa una discordancia de unos 10-12 dBm entre pruebas y especificaciones del producto. El margen de seguridad de 9dBm del apartado 2.8 fue correcto.

### 3.2.2. Resultado sobre pruebas de *throughput* en dinámico (*roaming*)

En este apartado se recogen todos los resultados extraídos en las pruebas de laboratorio una vez seguido el procedimiento expuesto en el apartado **2.10.3.3**.

En las primeras pruebas se detectó que el AP1-Canal100 tenía muchas caídas en la tasa de transferencia sin tocar la atenuación. Después de algunas pruebas se observa que, debido a las condiciones del laboratorio, el canal 100 sufre de interferencias. Esto es debido a que existen otros dispositivos en el mismo canal pertenecientes a otros proyectos que operan en el mismo laboratorio.

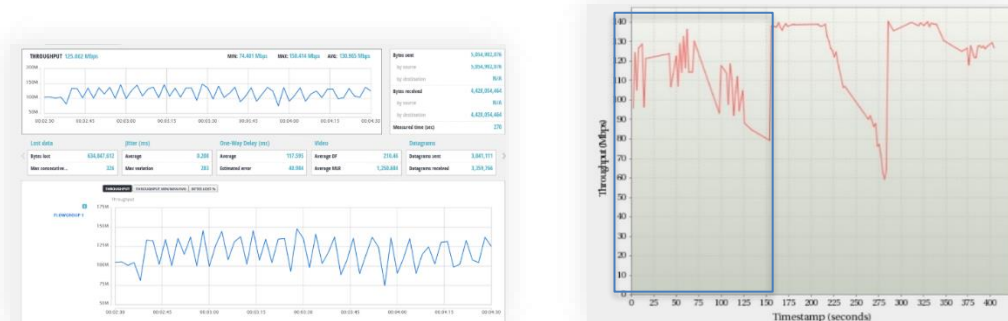


Figura 143 – Desvanecimientos/caídas en la tasa de throughput AP1 Canal 100

Se cambió el AP3 al canal 100 para ver si era un problema del AP1 y el resultado fue el mismo, el AP3, que antes trabajaba en el canal 132 sin problemas, empezó a mostrar desvanecimientos/caídas en la tasa de transferencia sin modificar la atenuación.

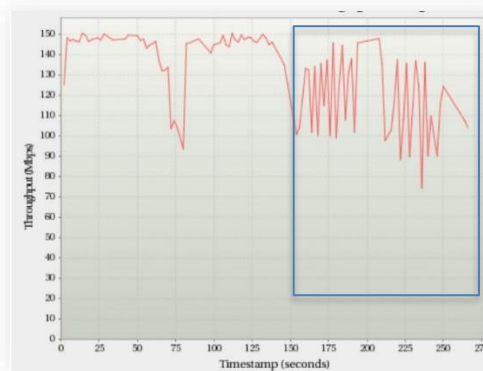


Figura 144 – Desvanecimientos/caídas en la tasa de throughput AP3 Canal 100

Como se puede observar en las figuras (Figura 143 y Figura 144), al operar en el canal 100 las pruebas se ven alteradas y se producen desvanecimientos en la señal. Llegados a este punto, se decide cambiar la configuración del AP1, y establecer 132 como canal de trabajo, ante la imposibilidad de apagar o reconfigurar los equipos en el entorno de laboratorio de otros proyectos que operan en ese canal.



**Conclusión:** las configuraciones, para los resultados que se muestran en los siguientes apartados, quedan así:

- AP1 – canal 132 --> atenuación aplicada a la frecuencia de trabajo 5660 MHz.
- AP2 – canal 108 --> atenuación aplicada a la frecuencia de trabajo 5540 MHz.
- AP3 – canal 132 --> atenuación aplicada a la frecuencia de trabajo 5660 MHz.

Se han realizado 9 pruebas con distintas configuraciones. Al igual que se indicó en las pruebas estáticas, por extensión del documento, se mostrará un ejemplo de la primera prueba ejecutada y una tabla como resumen de los resultados obtenidos. Por tanto, el resto del detalle de los resultados se desplaza al anexo 7.6.

Para el primer test se ha utilizado el escenario de atenuación 1 (ver Figura 145) y la configuración siguiente (valores por defecto del fabricante):

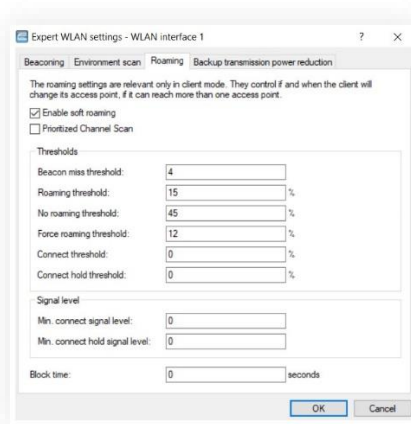


Figura 145 – Parámetros de configuración para OBM1 según test1

Estos valores se corresponden con los siguientes niveles de señal:

Tabla 37 – Equivalencia de % a dB/dBm en test1

	Test1 (%)	dB	Signal (dBm)
Roaming threshold	15	9,6	
No roaming threshold	45	28,8	-71,2
Force roaming threshold	12	7,68	-92,32
escenario 1			

En esta prueba, el cliente empieza a escanear a los -71dBm y se fuerza el *roaming* alrededor de los -92dBm si no existe una señal mejor. Además, se indica que la señal del siguiente AP debe ser de unos 9dB mejores que la del punto de acceso actual.

A continuación, se adjunta un pantallazo resumen con los resultados de la prueba:

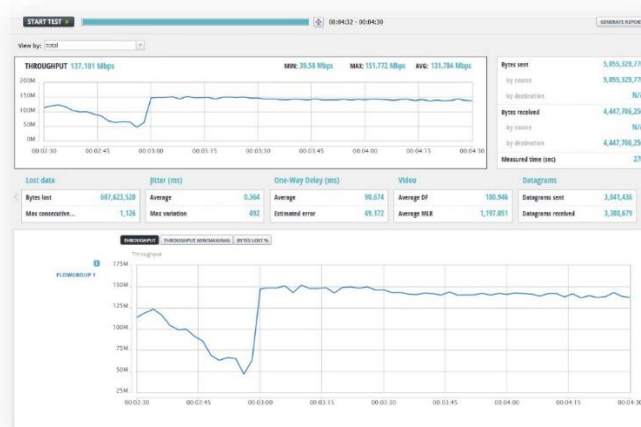


Figura 146 – Resumen throughput para test1

Como se puede observar en la Figura 146, en las pruebas de *roaming* del test1 se ha alcanzado:

- Un máximo de 151 Mbps.
- Un mínimo de 39 Mbps.
- Una media de 131 Mbps.

Si se observa la gráfica del *throughput* de la prueba completa:

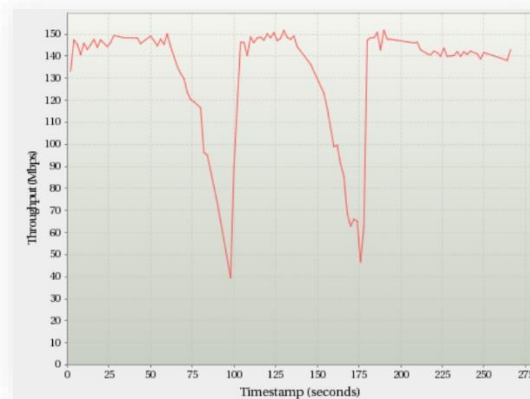


Figura 147 – Gráfica de throughput para test1

En la Figura 147 se pueden observar los 2 *roamings* que ejecuta el cliente:

- AP1>AP2: la tasa de transferencia cae a casi 40Mbps, pero no se corta la conexión por lo que el efecto es el esperado dado los valores por defecto del equipo (el *roaming* se produce en los niveles de señal desde -72 dBm a -92dBm).
- AP2>AP3: aquí la tasa de transferencia es un poco mejor, entre 40-50 Mbps, pero el comportamiento es similar.

El resto de los detalles de cada prueba se pueden consultar en el anexo 7.5.

Por tanto, se ha confeccionado un resumen con los resultados de las pruebas en la siguiente tabla:

Tabla 38 – Tabla de resultados pruebas dinámicas (40MHz)

		%	dB	Signal (dBm)	Velocidad de transferencia		Escenario de atenuación
<b>Test1</b>	Roamig threshold	15	9,6		Máx	151 Mbps	<b>1</b>
	No roaming threshold	45	28,8	-71,2	Min	39 Mbps	
	Forced roaming	12	7,68	-92,32	Media	131 Mbps	
<b>Test2</b>	Roamig threshold	8	5,12		Máx	151 Mbps	<b>1</b>
	No roaming threshold	50	32	-68	Min	41 Mbps	
	Forced roaming	12	7,68	-92,32	Media	133 Mbps	
<b>Test3</b>	Roamig threshold	8	5,12		Máx	150 Mbps	<b>1</b>
	No roaming threshold	50	32	-68	Min	74 Mbps	
	Forced roaming	41	26,24	-73,76	Media	130 Mbps	
<b>Test4</b>	Roamig threshold	8	5,12		Máx	150 Mbps	<b>1</b>
	No roaming threshold	55	35,2	-64,8	Min	46 Mbps	
	Forced roaming	45	28,8	-71,2	Media	136 Mbps	
<b>Test5</b>	Roamig threshold	8	5,12		Máx	151 Mbps	<b>1</b>
	No roaming threshold	60	38,4	-61,6	Min	64 Mbps	
	Forced roaming	51	32,64	-67,36	Media	136 Mbps	
<b>Test6</b>	Roamig threshold	8			Máx	153 Mbps	<b>1</b>
	No roaming threshold	70	44,8	-55,2	Min	59 Mbps	
	Forced roaming	61	39,04	-60,96	Media	140 Mbps	
<b>Test7</b>	Roamig threshold	8			Máx	152 Mbps	<b>1</b>
	No roaming threshold	78	49,92	-50,08	Min	85 Mbps	
	Forced roaming	61	39,04	-60,96	Media	138 Mbps	
<b>Test8</b>	Roamig threshold	7	4,48		Máx	150 Mbps	<b>1</b>
	No roaming threshold	62	39,68	-60,32	Min	49 Mbps	
	Forced roaming	42	26,88	-73,12	Media	135 Mbps	
<b>Test9</b>	Roamig threshold	7	4,48		Máx	150 Mbps	<b>2</b>
	No roaming threshold	62	39,68	-60,32	Min	X	
	Forced roaming	42	26,88	-73,12	Media	119 Mbps	

En el siguiente apartado se mostrarán las conclusiones para estas pruebas.

### 3.2.2.1. Conclusiones de las pruebas dinámicas

A continuación, se muestran todas las gráficas de *throughput* obtenidas en las pruebas:

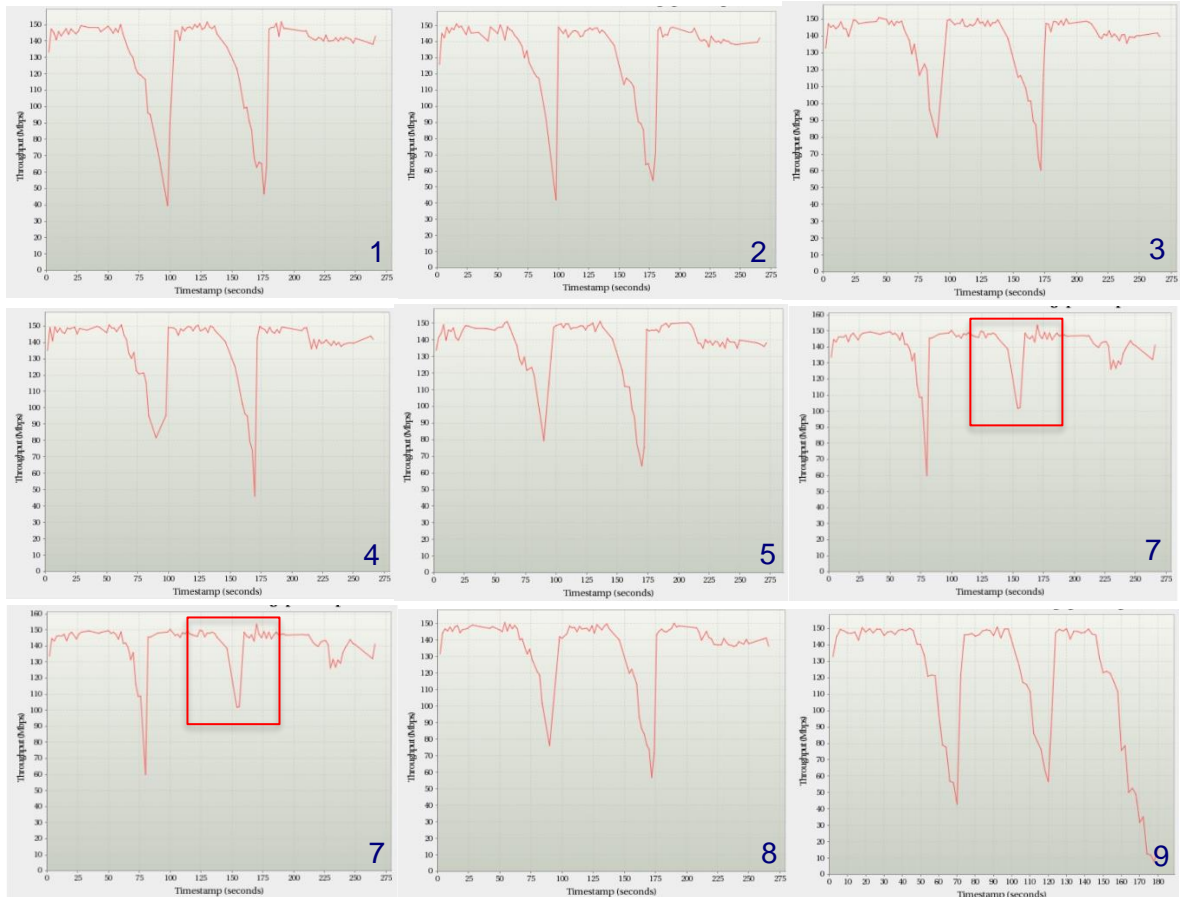


Figura 148 – Gráficas de *throughput* de los test 1-9

Observando las gráficas anteriores, se pueden sacar varias conclusiones importantes:

1. La comunicación tren-tierra no se interrumpe en ninguna de las nueve pruebas.
  - Se observa que cuando se produce el *roaming*, la tasa de transferencia disminuye. En la mayoría de las pruebas, esta disminución es del 50-60%.
  - Sin embargo, en los test 6 y 7 (ver recuadro rojo), se observa que la tasa de transferencia de AP2>AP3 es de 100Mbps, lo que implica una disminución del 30%. Esto es debido a que los parámetros de *roaming* se han ajustado óptimamente para las curvas de atenuación del AP2>AP3.
  - Durante la instalación en campo, para el proyecto, los parámetros de *roaming* han de ser ajustados con medidas reales de los niveles de señal recibidos a lo largo de la vía.
2. El comportamiento de los *roamings* no es uniforme:
  - Por una parte, depende de los parámetros de *roaming* configurados en el cliente. Por eso cada test tiene una gráfica diferente.

- Por otra parte, para un mismo test, el primer *roaming* (AP1>AP2) es diferente del segundo *roaming* (AP2>AP3). Esto es debido al *background scan* ya que, dependiendo del instante de tiempo de escaneo, el equipo es capaz de identificar la señal del nuevo AP como válida antes de que la señal se atenúa más -a menor nivel de señal, menor tasa de transferencia-.
3. El tiempo de *roaming* es rápido. Gracias a la funcionalidad *softroaming*, el cliente corta la conexión con el AP asociado y la establece, con el nuevo AP, sin corte de transmisión.

La siguiente tabla (Tabla 39) recopila los valores máximo, mínimo y media de *throughput* que se han obtenido en cada prueba:

Tabla 39 – Resultados de *throughput* máximo, mínimo y media

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	Test 9
Máx	151 Mbps	151 Mbps	150 Mbps	150 Mbps	151 Mbps	153 Mbps	152 Mbps	150 Mbps	150 Mbps
Min	39 Mbps	41 Mbps	74 Mbps	46 Mbps	64 Mbps	59 Mbps	85 Mbps	49 Mbps	X
Media	131 Mbps	133 Mbps	130 Mbps	136 Mbps	136 Mbps	140 Mbps	138 Mbps	135 Mbps	119 Mbps

Los valores máximos y medios se obtienen cuando el cliente está asociado de forma constante a un AP. Estos valores son similares en todas las pruebas, independientemente de la configuración. Sin embargo, los valores mínimos se obtienen cuando el cliente realiza el *roaming*. En el caso del test 9, indicar que la velocidad de transferencia mínima no se indica debido a que no existe un AP4 al que cambiar, y la señal se sigue atenuando, por lo tanto, este valor se omite.

También se observa en la comparación de las gráficas, que el desafío está en calibrar los parámetros de *roaming* para que sea lo óptimo dependiendo la situación: equilibrio a la hora de no permitir que la señal se degrade mucho.

Los valores de *roaming* configurados para los Test 8 y Test 9 son óptimos para la tasa de transferencia de 100Mbps esperada. Estos valores son de los que se partirá a la hora de caracterizar la configuración en campo.

### 3.2.2.2. Prueba extra tras resultados anteriores

Al recoger los resultados en laboratorio de los apartados anteriores, se trabajó en la idea de si la limitación de los equipos, en cuanto a la velocidad de transferencia, era algo en los puntos de acceso o en el cliente. Es decir, ¿qué ocurriría si se conectan dos clientes al mismo punto de acceso?, ¿podría el punto de acceso, en la etapa radio de recepción, procesar más tráfico?.

Para ello, se modificó la configuración 2 (Figura 98) para transformar un punto de acceso en un cliente. De esta manera el nuevo cliente, nombrado OBM2, se conectó en los puertos 6, 7 y 8 de las salidas del atenuador. Por otro lado, el OBM1 conectado a las bocas 1, 2 y 3 de las salidas del atenuador (como ya ocurría en las pruebas anteriores).

Se asociaron ambos OBM al AP1 con los siguientes niveles de señal:


Station	Address	Signal Level	Noise Level	SNR
 AP01	04:f0:21:b4:2b:8a	-40dBm	-101dBm	61dB
Ch 132 (5660 MHz)	locally seen:	-38dBm	-101dBm	65dB

Figura 149 – Niveles OBM1 asociado al AP1

Station	Address	Signal Level	Noise Level	SNR
 AP01	04:f0:21:b4:2b:8a	-34dBm	-101dBm	67dB
Ch 132 (5660 MHz)	locally seen:	-36dBm	-100dBm	64dB

Figura 150 – Niveles OBM2 asociado al AP1

Una vez asociados se conectó un nuevo portátil (*endpoint 3*) con la IP 10.196.2.52. A este equipo se le configuró la puerta de enlace como 10.196.2.26 (OBM2).

Con este escenario, se configura una prueba de un total de 200Mbps de velocidad de transferencia:

- 5 flujos de 20 Mbps OBM1 (*endpoint 1*) --> Tierra (*endpoint 2*)
- 5 flujos de 20 Mbps OBM2 (*endpoint 3*) --> Tierra (*endpoint 2*)

Los resultados obtenidos muestran que la velocidad de transferencia máxima de 140Mbps se reparten entre los 2 OBMs. Esto tiene sentido ya que el punto de acceso tiene que dividir



su interfaz radio para 2 clientes. Lo que confirma que la limitación que experimentan de los equipos BAT45-F es producida por el procesador del equipo. No es capaz de procesar más de 140Mbps.

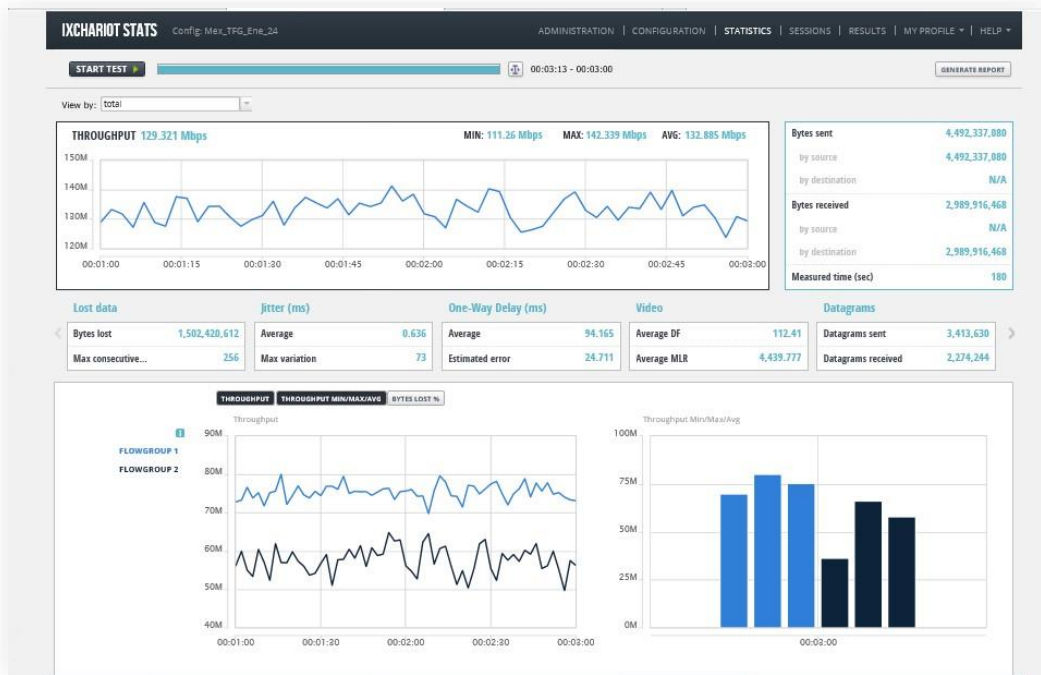


Figura 151 – Resultado de la prueba con 2 clientes conectados al mismo AP

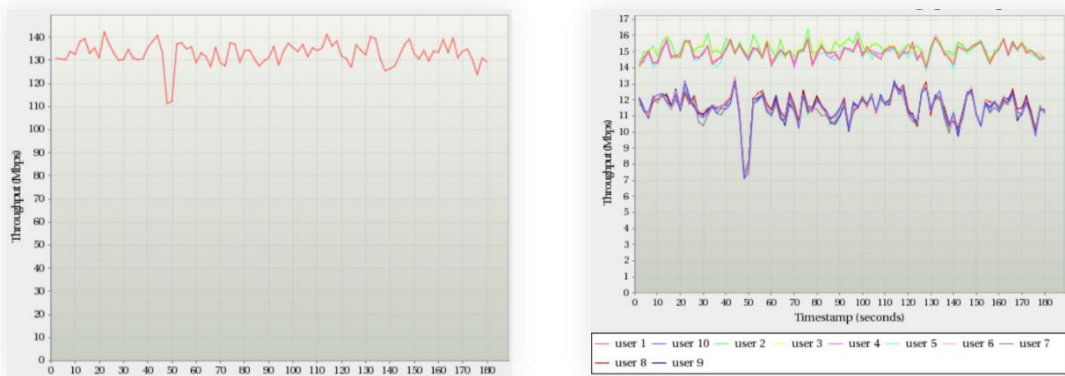


Figura 152 – Throughput total y por flujo

Por último, y para comprender mejor la Figura 152, los flujos del usuario 1 al 5 pertenecen al OBM1 y del 6 al 10 al OBM2. Como se puede observar, el OBM1 se mantiene a unos 70 Mbps y el OBM2 unos 60-65 Mbps. La suma de todos los flujos es de 140 Mbps, misma velocidad de transferencia alcanzado con un solo OBM asociado al mismo AP.

### 3.2.3. Resultado de la prueba final de descarga de grabaciones tren-tierra

Se han configurado la descarga de dos cámaras embarcadas:

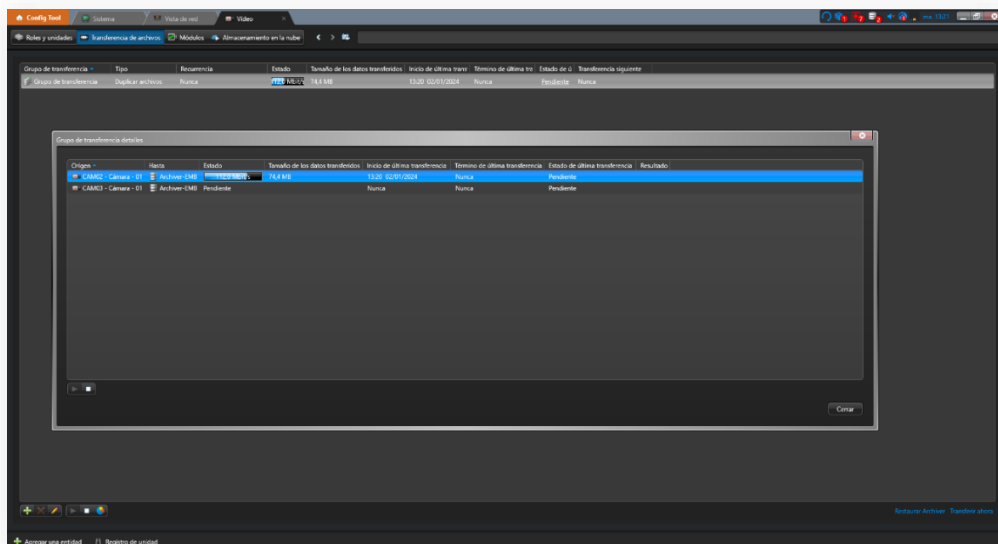


Figura 153 – Tarea de transferencia de ficheros

La tasa de descarga ha sido de 112 Mbps, tal y como se puede ver en detalle en la Figura 154:

Origen	Hasta	Estado	Tamaño de los datos transferidos	Inicio de última transferencia
CAM02 - Cámara - 01	Archiver-EMB	112,0 Mbit/s	74,4 MB	13:20 02/01/2024
CAM03 - Cámara - 01	Archiver-EMB	Pendiente		Nunca

Figura 154 – Detalle de tasa de transferencia en descarga de grabaciones

#### 3.2.3.1. Conclusión de la prueba final

La velocidad de descarga con el software de grabación es de 112Mbps. Por tanto, el objetivo fijado al inicio de este proyecto de alcanzar una velocidad de transferencia de 100Mbps en la descarga de grabaciones queda cumplido.

## 4. Conclusiones y trabajos futuros

Las conclusiones finales del proyecto, a partir de las identificadas durante los apartados de simulación y pruebas, son las siguientes:

1. El sistema es completamente funcional y alcanza la velocidad de transferencia objetivo de 100Mbps e incluso la supera en la mayoría de los casos alcanzando entre 140-160Mbps.
2. Se ha identificado una limitación en la tasa de transferencia del equipo ya que, a pesar de alcanzar valores SNR óptimos la velocidad de transferencia no aumenta y no se ajusta a lo que indica el estándar 802.11ac.
  - En canales con un ancho de banda de 40MHz a partir de un MCS3-4 la velocidad de transferencia media es de 160Mbps.
  - En canales con un ancho de banda de 80MHz la velocidad media es de 160Mbps independientemente del *coding* MCS negociado.
  - Tras consultarlo con el fabricante, indica que es debido a que la CPU del equipo es la misma que para el estándar 802.11n y que únicamente se ha actualizado la etapa *wireless* para la tecnología 802.11ac.
3. La tasa de transferencia se divide entre todos los clientes conectados al mismo punto de acceso. En la prueba **3.2.2.2** se conectaron 2 clientes al mismo AP y la tasa de transferencia se repartió entre ambos clientes manteniendo una tasa total de 140-160Mbps.
4. Se ha identificado que los valores de sensibilidad proporcionados por el fabricante para alcanzar cada uno de los MCS y por velocidades de transferencia asociados difieren en 12dB de las medidas realizadas en el laboratorio (ver apartado **7.2.1**).
  - Esto no es algo sorprendente, ya que las especificaciones técnicas de los fabricantes se proporcionan a partir de unos entornos aislados y muy controlados. Sin embargo, el laboratorio utilizado en este proyecto es un entorno compartido con múltiples sistemas radio que, operando en la misma banda de frecuencias, lo que ocasiona interferencias.
  - Esta diferencia de 12 dB se ve compensada con el margen para fading que se aplicó, en el apartado **2.8**, durante el cálculo de balance de potencias. Por lo tanto, los valores obtenidos en los cálculos, simulación y pruebas de laboratorio han estado alineados.
5. La comunicación tren-tierra no se ve interrumpida en ninguno de los *roamings* que los equipos han realizado durante las pruebas dinámicas.
  - Debido a la funcionalidad de *softroaming* implementada por los equipos clientes el proceso de escaneo, desasociación y asociación a un nuevo punto de acceso se realiza sin detener la transferencia de datos.
  - Durante los *roamings* la velocidad de transferencia disminuye en torno al 50-60%.

Con estas conclusiones, se puede afirmar que el objetivo inicial propuesto de transferencia a 100Mbps, tanto para entornos estáticos como dinámicos, ha sido conseguido y se obtiene un sistema totalmente funcional.

Respecto a la planificación y la metodología, ha sido un acierto adelantar las pruebas de laboratorio y realizarlas simultáneamente con otras partes más teóricas del proyecto. Por lo tanto, esto ha permitido tener el margen de tiempo suficiente para afrontar varias incidencias: acopio de material necesarios para las pruebas, reconfiguración de equipos debido a interferencias en la señal que bloqueaban los canales asignados inicialmente, etc.

En cuanto a los impactos e información expuesta en el apartado **1.3**, no ha existido desvío. Como se indicó en dicho apartado, tanto el entorno como los materiales, y equipos definidos, siguen las normas y legislaciones pertinentes en cada caso. A nivel de potencia de radiación, los equipos WiFi disponen de un certificado radioeléctrico indicando que se ajusta a la legislación del país.

Finalmente, ya que los sistemas de *Security* avanzan hacia un incremento en la cantidad de datos a comunicar, entre el tren y los equipos del Centro de Control. Se proponen dos líneas de trabajo futuro como mejoras al sistema, ambas relacionadas con un incremento en la velocidad de transferencia:

- Añadir equipamiento *hardware* a la tecnología propuesta (802.11ac):
  - Puntos de acceso: incluyendo una segunda antena conectada en el mismo AP, proporcionando señal a ambos sentidos de la vía. Para ello, habría que conectar un equipo, llamado *divisor* o *splitter*, a cada cable RF (al ser MIMO 3x3 serían tres *splitters*). Asumiendo una atenuación 3dB por el *splitter* y cableado extra, el mismo tramo de vía estaría cubierto por 2 APs aplicando este cambio.



Figura 155 – Splitter H&S 5504.17.0009

- Tren: incorporar la solución WiFi en ambas cabinas. De esta manera, cada módem estaría conectado a un AP de vía por lo que se tendría el doble de velocidad de transferencia 160Mbps+160Mbps.
- Investigación de otras tecnologías actuales como WiFi6 (802.11ax) o incluso LTE/5G. Utilizando la misma metodología y pruebas se podría analizar la velocidad de transferencia máxima de estos estándares.

## 5. Glosario

Tabla 40 – Glosario del proyecto

Archivos OVA	Es la extensión de fichero más común en máquinas virtuales exportadas. La principal ventaja es que, al importarla en el sistema, los programas y configuraciones están preinstaladas.
10/100/1000Base-T	Esta nomenclatura se utiliza para indicar que una interfaz de red es compatible con las velocidades de 10, 100 y 1000 Mbps. La T indica que la tecnología es Ethernet.
2U	Es la medida que se usa para indicar el espacio en un armario <i>rack</i> . Por tanto, 2U son 2 unidades <i>rack</i> .
Belden	Es un fabricante de EEUU de equipos de transmisión. En concreto para este proyecto, proporciona los equipos Hirschmann, empresa que compraron en 2007.
CCTV	Son las siglas de <i>Closed Circuit Television</i> , en castellano se traduce como <i>Circuito Cerrado de Televisión</i> . Se denomina así porque sólo puede ser visualizado por un grupo concreto de personas.
CPU	<i>Unidad Central de Procesamiento</i> . Es un componente electrónico presente en ordenadores, móviles, puntos de acceso, etc. Se encarga de interpretar las instrucciones de los distintos programas informáticos.
Data Rate	Es la <i>velocidad de transmisión</i> de un sistema. Se mide por números de bits transmitidos por unidad de tiempo.
DIN3	Es una barra de metal que se instala a modo de anclaje. Esta es la denominación más común para carril simétrico (35 mm x 7.5 mm).
ERTMS	<i>Sistema Europeo de Gestión de Tráfico</i> . Este sistema se utiliza en el sector ferroviario como sistema de seguridad: el tren conoce las condiciones de vía y adapta la velocidad, de manera dinámica, a ella.
Ethernet	Tecnología que permite la conexión de equipos por cable. Los equipos conectados mediante este tipo de cables forman una red de área local. El protocolo más actual y extendido es el IEEE 802.3.
Gateway	Es un equipo que funciona como <i>puerta de enlace</i> entre una red, normalmente local, y otra externa (como Internet).
GB	<i>Gigabyte</i> . Unidad de almacenamiento de información. Es una medida estandarizada. Equivale a 2 <sup>9</sup> bytes.
GbE	<i>Gigabit Ethernet</i> . Tecnología <i>ethernet</i> de alta velocidad. Estas siglas se indican precedida de un número que indica la velocidad del puerto. Por ejemplo, un puerto 10GbE indica una velocidad de 10 Gigabits de velocidad de transmisión.
Genetec	Genetec es una empresa líder en el sector de la seguridad IP. Sus 2 tecnologías más implementadas a nivel mundial son Omnicast (CCTV) y Synergis (Control de Accesos).
GSM	<i>Sistema global para comunicaciones móviles</i> . Este sistema estándar de comunicaciones es conocido como 2G (estándar

	de segunda generación). Permite comunicaciones móviles y se ha implementado en distintas bandas dependiendo su uso.
GSM-R	<i>Global System for Mobile Communications – Railway</i> . En este caso es el sistema GSM adaptado al sector ferroviario. Es la principal tecnología de comunicación tren-tierra para ERTMS.
Hirschmann	Proveedor líder en equipos, redes y soluciones de telecomunicaciones industriales. En este proyecto el núcleo del sistema, puntos de acceso y módem, son equipos diseñados por esta compañía.
Huber&Sunher	Empresa suiza especializada en el desarrollo y fabricación de componentes electrónicos. En este proyecto provee de componentes como las antenas, protectores, cables RF, etc.
ICMP	<i>Protocolo de mensajes de control de Internet</i> . Es un protocolo de la capa de red. Se usa para confirmar si los paquetes han alcanzado su destino o no en un tiempo determinado. En este proyecto se utiliza para conocer la conectividad de los equipos.
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. Es una sociedad técnico-profesional cuyo propósito es promover y divulgar los avances en ingeniería eléctrica, electrónica, energética e informática. También está dedicada a la definición de normas para estándares de comunicación. Entre ellas: IEEE 802 LAN/MAN, IEEE 802.3 Ethernet y IEEE 802.11 de red inalámbrica
IPXX	<i>Degrees of Protection</i> . Norma internacional CEI 60529 que indica la protección de equipos. Los grados más comunes para los equipos en este tipo de proyectos son: IP65: Protección total frente al polvo y chorros de agua. IP66: Equipo hermético al polvo y protegido contra chorros de agua potentes. IP67: Equipo hermético al polvo y protegido contra la inmersión.
Mbps	<i>Megabits por segundo</i> . Indica la velocidad de bits transmitidos en un segundo. En este caso 1.048.576 bit = 1024 Kbit = 1 Mbits por segundo.
MIMO	<i>Múltiples entradas Múltiples salidas</i> . Esta tecnología indica que existen varias antenas conectadas en emisor y en receptor, por lo tanto, se permite el envío/recepción de señales por todas ellas.
NLSAS	<i>Near Line SAS (Serial Attached SCSI [Small Computer System Interface])</i> . Es una tecnología para transferencia de datos en discos de almacenamiento.
OFDM	<i>Multiplexación por división de frecuencias ortogonales</i> . Es un esquema que se usa como método de modulación multiportadora digital para la transmisión de símbolos en señales.
RAID	<i>Redundant array of independent disk</i> . Con esta configuración de discos se protege la información. Existen varios tipos de RAID y se utilizan para proteger la información en caso de que un disco duro falle físicamente.



RAM	<i>Memoria de acceso aleatorio.</i> Es una memoria de almacenamiento de almacenaje a corto plazo. Un banco de memoria temporal en el que se almacenan datos/información para que los equipos accedan más rápidamente a ella.
Roaming	En este proyecto se usa para referirse a la acción por la que un cliente cambia de punto de acceso al que está asociado.
Rogue	Punto de acceso no autorizado que se conecta a la red de una organización.
SATA	<i>Serial Advanced Technology Attachment.</i> Es una interfaz de transferencia de datos entre placa base y dispositivos de almacenamiento.
Security Center	<i>Suite</i> informática que funciona como interfaz entre los distintos módulos de seguridad de la empresa Genetec. Funciona como HMI (interfaz humano-máquina).
SFP+	<i>Small form-factor pluggable plus.</i> Dispositivo de entrada/salida para cables de comunicaciones de fibra óptica. Estos conectores se usan en <i>switches</i> de comunicaciones para interconectar redes a grandes distancias (las comunicaciones con cables ethernet tienen una limitación, en la distancia a cubrir, de 100 metros aproximadamente).
SNMP	<i>Protocolo simple de administración de red.</i> Este protocolo, implementado en componentes de red, se utiliza para la administración y monitorización del estado de los equipos conectados a esa red.
Spoofing	Consiste en robar una identidad electrónica para ocultar la propia identidad (suplantar).
SSD	<i>Unidad de estado sólido.</i> Almacenamiento de datos que utiliza memoria no volátil. La diferencia con los llamados “discos duros” es que carece de la parte mecánica de estos.
Switching	Proceso por el que se envían/reciben tramas de un lado a otro de la red.
TB	<i>Terabyte.</i> 1 TB = 103 GB = 106 MB = 109 kB = 1012 bytes.
TCP/IP	<i>Protocolo de control de transmisión/protocolo de Internet.</i> Protocolo, perteneciente a la capa de enlace, que utilizan los equipos conectados a Internet para envío y recepción de datos.
TETRA	<i>Terrestrial Trunked Radio.</i> Estándar definido por el IEEE que define un sistema móvil digital de radio. Nació con el objetivo de unificar los distintos interfaces de radio digitales.
Throughput	<i>Tasa de transferencia efectiva.</i> Volumen de información neto que fluye a través de un sistema. En este proyecto se usará para indicar la velocidad de transferencia máxima, mínima y media en las sondas de red ( <i>endpoints</i> ).
WiFi	<i>Wireless fidelity o fidelidad inalámbrica.</i> Sistema que permite la conexión de los equipos sin cables mediante frecuencias de radio. Al carecer de cables su medio de transporte es el aire.
WLC	<i>Wireless LAN Controller.</i> Sistema que administra y monitoriza los elementos <i>wireless</i> de un sistema.

## 6. Bibliografía

- [1] Briso-Rodriguez, C. (2010). Comunicaciones móviles 4G en el ferrocarril (Doctoral dissertation, Universidad Politecnica de Madrid).  
[http://oa.upm.es/8713/2/INVE\\_MEM\\_2010\\_83175.pdf](http://oa.upm.es/8713/2/INVE_MEM_2010_83175.pdf)
- [2] UIC - International union of railways (visitada en diciembre/2023)  
<https://uic.org/>
- [3] Bakarić, S., Borzic, M., Bratković, D., & Grga, V. (2005, June). TETRA (terrestrial trunked radio)-technical features and application of professional communication technologies in mobile digital radio networks for special purpose services. In 47th International Symposium ELMAR, 2005. (pp. 307-310). IEEE.  
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1505706>
- [4] PlayRenfe (visitada en octubre/2023)  
<https://www.renfe.com/es/es/viajar/el-viaje/a-bordo/playrenfe/que-es-play-renfe>
- [5] Tebatren - Metro de Madrid (visitada en octubre/2023)  
<https://www.coit.es/sites/default/files/ppt-coit-metro-madrid.pdf>
- [6] Banerji, S., & Chowdhury, R. S. (2013). On IEEE 802.11: wireless LAN technology. arXiv preprint arXiv:1307.2661.  
<https://arxiv.org/abs/1307.2661>
- [7] Ekahau Sidekick – datasheet (visitada en octubre/2023)  
<https://www.ekahau.com/wp-content/uploads/2020/05/Ekahau-Sidekick-Data-Sheet-2.pdf>
- [8] XIRIO manual de usuario (visitada en octubre/2023)  
<https://www.xirio-online.com/web/help/es/index.htm#:~:text=Xirio%2DOnline%20es%20una%20herramienta,planificaci%C3%B3n%20ni%20cartograf%C3%ADa%20digital%20propias.>
- [9] WLC Belden (hardware) (visitada en octubre/2023)  
<https://www.belden.com/products/By-Brand/Hirschmann/Wireless/BAT-WLC-Controller>
- [10] WLC Belden (software) (visitada en octubre/2023)  
<https://www.belden.com/products/Industrial-Networking-Cybersecurity/Wireless/Wireless-LAN/BAT-Controller-Virtual>
- [11] Genetec – Security Center (visitada en octubre/2023)  
<https://www.genetec.com/es/productos/seguridad-unificada/security-center>

- [12] ESXi – VmWare (visitada en octubre/2023)  
<https://www.vmware.com/es/products/esxi-and-esx.html>
- [13] HUAWEI – ESXi (visitada en octubre/2023)  
<https://support.huawei.com/enterprise/es/doc/EDOC1000109918/81e6767b/installing-the-vmware-esxi-system>
- [14] On IEEE 802.11: wireless LAN technology - Banerji, S., & Chowdhury, R. S. (2013).  
On IEEE 802.11: wireless LAN technology. arXiv preprint arXiv:1307.2661.  
<https://arxiv.org/abs/1307.2661>
- [15] G. R. Hiertz, D. Denteneer, L. Stibor, Y. Zang, X. P. Costa and B. Walke, "The IEEE 802.11 universe," in IEEE Communications Magazine, vol. 48, no. 1, pp. 62-70, January 2010, doi: 10.1109/MCOM.2010.5394032.  
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5394032>
- [16] On IEEE 802.11: Wireless LAN Technology - Sourangsu Banerji<sup>1</sup>, Rahul Singha Chowdhury<sup>2</sup> – 2013.  
<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1307/1307.2661.pdf>
- [17] Espectro ensanchado por secuencia directa (visitada en noviembre/2023)  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_ensanchado\\_por\\_secuencia\\_directa](https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_ensanchado_por_secuencia_directa)
- [18] Complementary code keying (visitada en noviembre/2023)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Complementary\\_code\\_keying](https://en.wikipedia.org/wiki/Complementary_code_keying)
- [19] Castillo-Soria Francisco Rubén, Sánchez-García Jaime, Parra-Michel Ramón, Flores-Troncoso Jorge, Fernández-Torres Gustavo - La modulación espacial, una comparación de las técnicas básicas de transmisión, 2016.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1405774316300117>
- [20] Beamforming y MIMO: Apuntar en la buena dirección – 16/04/2023 (visitada en diciembre/2023)  
<https://www.acrylicwifi.com/blog/beamforming-mimo/>
- [21] Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) [MATHLAB] (visitada en noviembre/2023)  
<https://es.mathworks.com/discovery/ofdm.html>
- [22] Concepts of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and 802.11 WLAN

[https://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/wlan-ofdm/content/ofdm\\_basicprinciplesoverview.htm](https://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/wlan-ofdm/content/ofdm_basicprinciplesoverview.htm)

- [23] OFDM Baseband Receiver Design for Wireless Communications  
Author(s):Tzi-Dar Chiueh Ph.D. in electrical engineering,, Pei-Yun Tsai Ph.D. in electrical engineering, First published:27 September 2007
- [24] Sistemas de Comunicación Inalámbrica MIMO – OFDM - Cesar V. Vargas, Wilson E. Lopez, Carlos F. da Rocha  
[http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1683-07892007000200009](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892007000200009)
- [25] Estudio, pruebas y simulación del estándar IEEE 802.11ac basándose en MU-MIMO – Ricardo Llugsi, Fleipe Llangarí y Enrique Mejía – 2017  
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/24008>
- [26] MCS – Cisco – 802.11ac – 2020 (visitada en noviembre/2023)  
<https://community.cisco.com/t5/wireless-mobility-knowledge-base/802-11ac-mcs-rates/tap/3155920>
- [27] L. Verma, M. Fakharzadeh and S. Choi, "Wifi on steroids: 802.11AC and 802.11AD," in IEEE Wireless Communications, vol. 20, no. 6, pp. 30-35, December 2013, doi: 10.1109/MWC.2013.6704471.  
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6704471>
- [28] Unlicensed National Information Infrastructure (U-NII) Devices in the 5 GHz Band – 2014 (visitada en Noviembre/2023)  
<https://www.federalregister.gov/documents/2014/05/01/2014-09279/unlicensed-national-information-infrastructure-u-nii-devices-in-the-5-ghz-band>
- [29] Unlicensed National Information Infrastructure (visitada en noviembre/2023)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Unlicensed\\_National\\_Information\\_Infrastructure](https://en.wikipedia.org/wiki/Unlicensed_National_Information_Infrastructure)
- [30] Controlador Wireless Lan y su implantación en la nube – 2014 (visitada en noviembre/2023)  
<https://www.teldat.com/es/blog/controlador-wireless-lan-y-su-implantacion-en-la-nube/>
- [31] Cisco Unified Wireless Technology and Architecture [LWAPP] (visitada en noviembre/2023)  
<https://www.cisco.com/en/US/docs/solutions/Enterprise/Mobility/emob30dg/TechArch.html>
- [32] Introduction to CAPWAP Protocol (visitada en noviembre/2023)  
<https://ipwithease.com/introduction-to-capwap-protocol/>

- [33] Autenticación Web Externa Usando un Servidor RADIUS (visitada en noviembre/2023)  
[https://www.cisco.com/c/es\\_mx/support/docs/wireless/5500-series-wireless-controllers/112134-external-web-radius-00.html](https://www.cisco.com/c/es_mx/support/docs/wireless/5500-series-wireless-controllers/112134-external-web-radius-00.html)
- [34] CISCO WLC (visitada en noviembre/2023)  
<https://www.cisco.com/site/us/en/products/networking/wireless/wireless-lan-controllers/index.html>
- [35] BAT-controller virtual (visitada en diciembre/2023)  
<https://www.belden.com/products/Industrial-Networking-Cybersecurity/Wireless/Wireless-LAN/BAT-Controller-Virtual>
- [36] ¿Qué es VMware vSphere? ¿Qué es la virtualización? – Manuel Serrano – 2021 (visitada en noviembre/2023)  
<https://virtualizadesdezero.com/vmware-vmware/>
- [37] What Is Network Management? – CISCO (visitada en noviembre/2023)  
<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/enterprise-networks/what-is-network-management.html>
- [38] Huawei Network Management System (visitada en diciembre/2023)  
<https://actfornet.com/huawei-net/nm.html>
- [39] Hirschmann Industrial HiVision (visitada en diciembre 2023)  
<https://www.belden.com/products/Industrial-Networking-Cybersecurity/Software-Solutions/Network-Management-Software/Industrial-HiVision-Network-Management-Software#numberOfResults=25>
- [40] CNAF de México (visitada en noviembre/2023)  
<https://www.ift.org.mx/espectro-radioelectrico/cuadro-nacional-de-atribucion-de-frecuencias-cnaf>
- [41] 2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz: ¿Cuál es la diferencia? (visitada diciembre/2023)  
<https://www.intel.la/content/www/xl/es/products/docs/wireless/2-4-vs-5ghz.html>
- [42] List of WLAN channels – Wikipedia (visitada diciembre/2023)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_WLAN\\_channels](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_WLAN_channels)
- [43] Conceptos básicos sobre los balances de los enlaces y las cadenas de señales de RF (visitada en diciembre/2023)  
<https://resources.altium.com/es/p/rf-signal-chain-and-link-budget-basics-iot>

- [44] MCS Table and HOW to use it (visitada en diciembre/2023)  
<https://wlanprofessionals.com/mcs-table-and-how-to-use-it/>
- [45] Ekahau Site Survey, la herramienta preferida por BBVA para diseñar sus redes wifi (visitada en diciembre/2023)  
<https://www.redeweb.com/actualidad/ingenieria/ekahau-site-survey-la-herramienta-preferida-por-bbva-para-disenar-sus-redes-wifi/>
- [46] Página web del software WiFi de Belden (herramientas)  
<https://www.belden.com/products/Industrial-Networking-Cybersecurity/Software-Solutions/Software-Tools>
- [47] WLC virtual  
<https://www.belden.com/products/Industrial-Networking-Cybersecurity/Wireless/Wireless-LAN/BAT-Controller-Virtual>
- [48] Suite Security Center 5.11 de Genetec  
<https://www.genetec.com/product-releases/security-center-5-11>



## 6.1. Bibliografía para figuras y tablas

A continuación, las fuentes de las figuras utilizadas en el proyecto:

- [49] Figura 5 – Diagrama Tren Maya [49]  
<https://www.trenmayatrips.com/es/planifica-tu-viaje-en-tren-maya-mapa-de-rutas-y-atracciones-imperdibles>
- [50] Figura 8 – TEBATREN Metro de Madrid [50]  
<https://www.coit.es/sites/default/files/archivobit/pdf/fabian.pdf>
- [51] Figura 10 – Ejemplo de interfaz gráfica del software Ekahau [51]  
<https://www.ekahau.com/blog/my-favorite-features-of-ekahau-sidekick/>
- [52] Figura 12 – Ejemplo de cobertura radio en XIRIO ONLINE [52]  
<https://aptica.es/ingenierias-y-consultoras-se-decantan-por-xirio-online-y-cartografia-3d-para-el-diseno-de-los-nuevos-despliegues-de-orange/>
- [53] Figura 17 – Modulación DSS (Direct Sequence Spread Spectrum)  
<https://www.telecomabc.com/d/dsss.html>
- [54] Figura 18 – Modulación CCK (Complementary Code Keying)  
<https://www.rfwireless-world.com/Terminology/CCK-vs-DSSS-vs-OFDM.html>
- [55] Figura 19 – 16-QAM vs 64-QAM de manera ideal y Figura 20 – 16QAM vs 64 QAM de manera no ideal  
<https://www.comunicacionesinalambricashoy.com/wireless/conceptos-tecnicos-sobre-modulacion/>
- [56] Figura 23 – Propagación por trayecto múltiple  
<https://blog.albentia.com/2013/09/05/modulacion-ofdm-wimax-madrid/>
- [57] Figura 24 – Representación tiempo-frecuencia de una señal OFDM  
[https://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/wlan-ofdm/content/ofdm\\_basicprinciplesoverview.htm](https://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/wlan-ofdm/content/ofdm_basicprinciplesoverview.htm)
- [58] Figura 25 – Pulso rectangular en el tiempo y Figura 26 – Transformada de Fourier de un pulso (sinc)  
[http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/simbolico/fourier/fourier\\_1.html](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/simbolico/fourier/fourier_1.html)
- [59] Figura 28 – OFDM - Prefijo cíclico en 3 símbolos  
<https://blog.albentia.com/2013/09/05/modulacion-ofdm-wimax-madrid/>
- [60] Tabla 4 - Especificaciones del estándar 802.11ac [60]

<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/24008>

- [61] Figura 30 – OFDM+MIMO esquema típico [61]  
[https://www.researchgate.net/figure/MIMO-OFDM-System-model-MIMO-OFDM-communication-system-has-N-transmitting-antennas-and-M\\_fig1\\_313955547](https://www.researchgate.net/figure/MIMO-OFDM-System-model-MIMO-OFDM-communication-system-has-N-transmitting-antennas-and-M_fig1_313955547)
- [62] Figura 31 – 64-QAM vs 256-QAM  
[https://www.researchgate.net/figure/64-QAM-256-QAM-and-1024-QAM-states-Source-QAM-modulator-and-demodulator-Faststream\\_fig1\\_365972263](https://www.researchgate.net/figure/64-QAM-256-QAM-and-1024-QAM-states-Source-QAM-modulator-and-demodulator-Faststream_fig1_365972263)
- [63] Tabla 5 - Subportadoras OFDM en 802.11ac [63]  
[http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1683-07892007000200009](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892007000200009)
- [64] Figura 32 – Tipos de subportadoras (OFDM)  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Acceso\\_m%C3%BAltiple\\_por\\_divisi%C3%B3n\\_de\\_frecuencias\\_ortogonales](https://es.wikipedia.org/wiki/Acceso_m%C3%BAltiple_por_divisi%C3%B3n_de_frecuencias_ortogonales)
- [65] Tabla 6 – MCS 802.11ac (1 stream) [65]  
<https://community.cisco.com/t5/wireless-mobility-knowledge-base/802-11ac-mcs-rates/tap/3155920>
- [66] Figura 33 – Trama VHT en 802.11ac  
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/24008>
- [67] Figura 34 – 802.11 ac frecuencias  
<https://interline.pl/Information-and-Tips/width-Channels-Wi-Fi-Networks>
- [68] Figura 35 – DFS en 5GHz  
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6704471>
- [69] Figura 36 – WLC – LWAPP  
<https://www.cisco.com/en/US/docs/solutions/Enterprise/Mobility/emob30dg/TechArch.html>
- [70] Figura 37 – WLC – CAPWAP  
<https://ipwithease.com/introduction-to-capwap-protocol/>
- [71] Figura 38 – WLC – RADIOUS  
[https://www.cisco.com/c/es\\_mx/support/docs/wireless/5500-series-wireless-controllers/112134-external-web-radius-00.html](https://www.cisco.com/c/es_mx/support/docs/wireless/5500-series-wireless-controllers/112134-external-web-radius-00.html)
- [72] Figura 43 – Plataforma virtual ESXi [72]  
<https://virtualizadesdezero.com/vmware-vmware/>

- [73] Figura 44 – Virtualización VMWare Vsphere [73]  
<https://www.profesionalreview.com/2018/12/20/vmware-vsphere/>
- [74] Figura 45 – Interfaz gráfica NMS [74] y Figura 46 – Interfaz gráfica analizador de trafico de red [74]  
<https://actfornet.com/huawei-net/nm.html>
- [75] Figura 57 – Canales WiFi de 40MHz seleccionados [75]  
[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_WLAN\\_channels](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_WLAN_channels)

## 7. Anexos

### 7.1. Datasheets

#### 7.1.1. Punto de acceso WiFi

A continuación, se adjunta el *datasheet* en formato pdf por si se necesitase su consulta.



BAT450-FMX599AN9  
K9AT6T7N99DZH.pdf

#### 7.1.2. Antena de Vía

A continuación, se adjunta el *datasheet* en formato pdf por si se necesitase su consulta.



HUBER+SUHNER  
1356.17.0090 DataSheet

#### 7.1.3. Antena Embarcada

A continuación, se adjunta el *datasheet* en formato pdf por si se necesitase su consulta.



HUBER\_2bSUHNER\_  
1356\_17\_0010\_DataSheet

#### 7.1.4. Atenuador variable

A continuación, se adjunta el *datasheet* en formato pdf por si se necesitase su consulta.

Lab Brick LDA-906V-8 de VAUNIX



lda-906v-8-rev-a1.pdf

### 7.1.5. Fuente de alimentación 24V DC

A continuación, se adjunta el *datasheet* en formato pdf por si se necesitase su consulta.



PULSE\_80W.pdf

### 7.1.6. Conversor de medios SPIDER PL 40

A continuación, se adjunta el *datasheet* en formato pdf por si se necesitase su consulta.



SPIDER-PL-40.pdf

### 7.1.7. Descargador/*Surge arrestor*

A continuación, se adjunta el *datasheet* en formato pdf si se necesitase su consulta.



Descargador.pdf

### 7.1.8. BAT-Controller virtual

A continuación, se adjunta el *datasheet* en formato pdf por si se necesitase su consulta.



BATControllerVirtual\_techdata.pdf

### 7.1.9. Caja de vía

A continuación, se adjunta el *datasheet* en formato pdf por si se necesitase su consulta.



caja via  
datasheet.pdf

## 7.1.10. Software Wireless LAN

A continuación, se adjunta los *datasheet* en formato pdf por si se necesitase su consulta.



BAT-Controller-Virtual-Specs.pdf



Hirschmann-Industrial-HiVision.pdf



Release\_Information\_BAT\_Management



Release\_Information\_BAT\_Management

## 7.1.11. Armario tipo RACK

A continuación, se adjunta los *datasheet* en formato pdf por si se necesitase su consulta.



RACK\_wi02200-02.pdf

## 7.1.12. Security Center

A continuación, se adjunta los *datasheet* en formato pdf por si se necesitase su consulta.



Genetec-Security-Center.pdf

## 7.1.13. Huawei Atlas 800 (modelo 3000)

A continuación, se adjunta los *datasheet* en formato pdf por si se necesitase su consulta.



Atlas800\_3000.pdf

## 7.1.14. Streamvault de Genetec

A continuación, se adjunta los *datasheet* en formato pdf por si se necesitase su consulta.



streamvault-sv-2000e.pdf



## 7.1.15. Huawei switch S5731-S24P4X

A continuación, se adjunta los *datasheet* en formato pdf por si se necesitase su consulta.



Huawei  
CloudEngine S5731-

## 7.2. Manuales de usuario/referencia

### 7.2.1. Punto de acceso/cliente

Para más información sobre el punto de acceso/cliente se puede consultar el pdf adjunto a continuación:



IG\_BAT450-F\_11\_11  
19\_en\_2019-11-20.p

## 7.3. Configuración de los equipos para pruebas estáticas

### 7.3.1.1. Configuración de Punto de Acceso

La configuración que se ha establecido, para que el equipo funcione en modo punto de acceso, es la siguiente (se ha partido desde la configuración por defecto y usado el entorno gráfico de la herramienta “LANConfig”):

- **Configuration>Management>General:** aquí se establece el nombre del equipo, localización, administrador y existen campos de texto para poder indicar otros comentarios. En este caso queda como se muestra en la Figura 156.

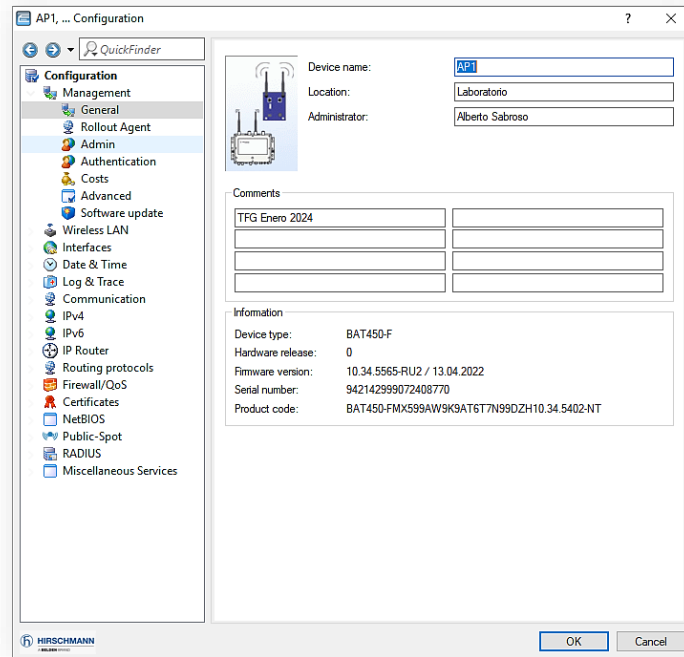


Figura 156 – Pestaña “General” de la configuración

- **Configuration>Management>Admin:** aquí se define la contraseña de acceso para la administración del equipo en el campo “Main device password” (ver Figura 157):

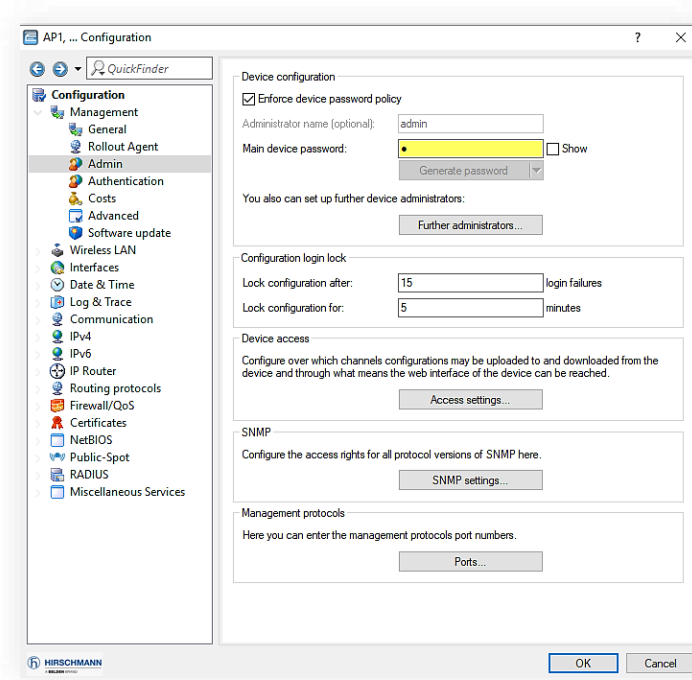


Figura 157 – Pestaña “Admin” de la configuración

- **Configuration>Wireless LAN>General:** se configura el país en el que va a operar el equipo, en este caso “México”:

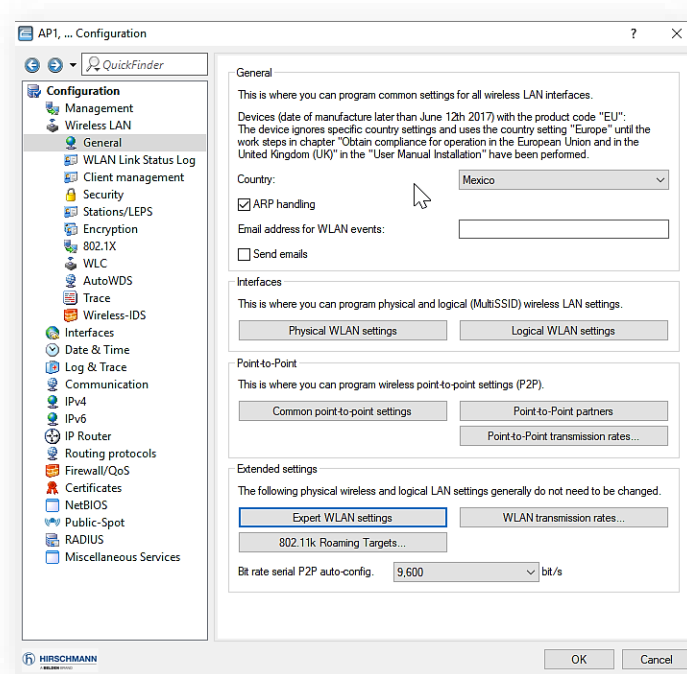


Figura 158 – Pestaña “General” de la configuración

- Configuration>Wireless>General>”Physical WLAN Settings”**: en esta pestaña se define toda la configuración para la operativa del equipo, en este caso para el parámetro “WLAN Operation Mode” se indica el valor “Access Point”:

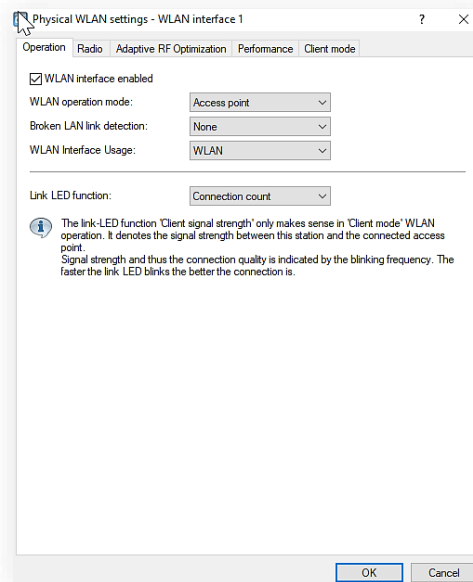


Figura 159 – Pestaña “Physical WLAN Settings>Operation” de la configuración

En la siguiente pestaña, “Radio”, se indican los valores a los que trabajará el equipo. En el caso del ejemplo que se muestra a continuación, la configuración es para 40MHz y se operará en los canales 132, 136 (Sub-banda 2), la frecuencia de operación será la 5660MHz, tal y como se muestra en Figura 160:

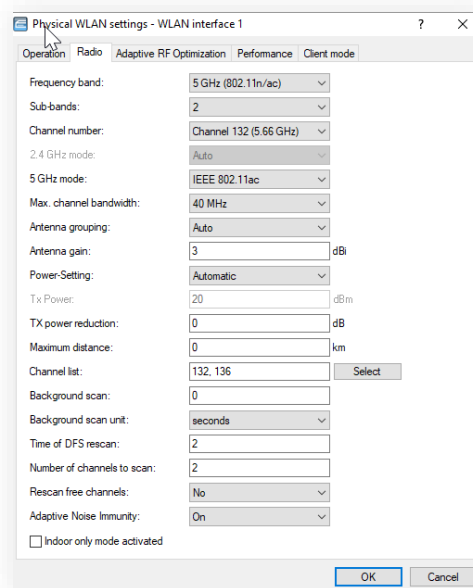


Figura 160 – Pestaña “Physical WLAN Settings>Radio” de la configuración

El resto de las pestañas: “Adaptative RF Optimization”, “Performance” y “Client Mode” permanecen con los valores por defecto ya que, para las pruebas en estático no tienen impacto.

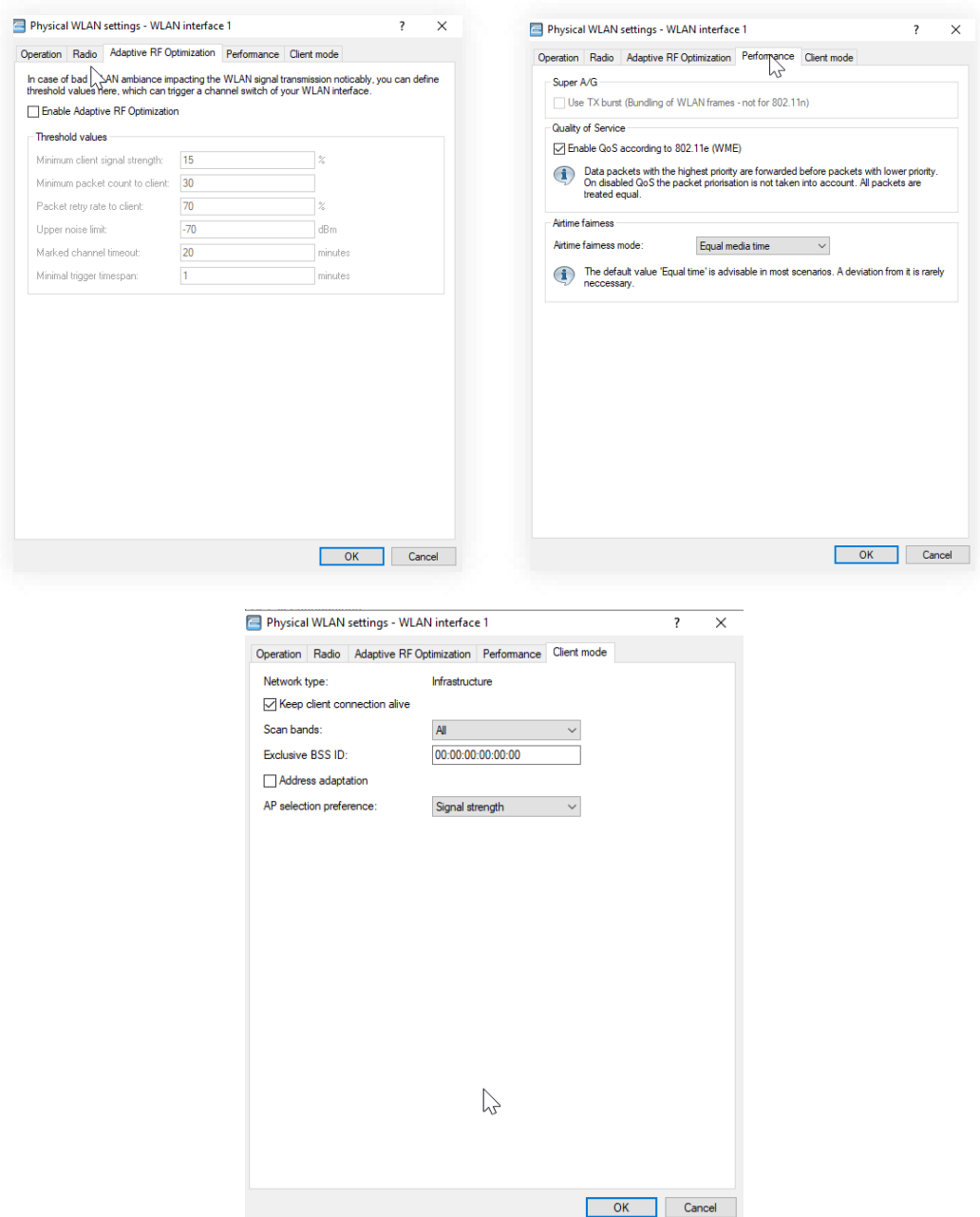


Figura 161 – Pestaña “Physical WLAN Settings (por defecto)” de la configuración

- **Configuration>Wireless>General>”Logical WLAN Settings>Network”**: se configuran los parámetros lógicos del sistema, tales como el SSID y la contraseña (encriptada) para autenticarse en la red.

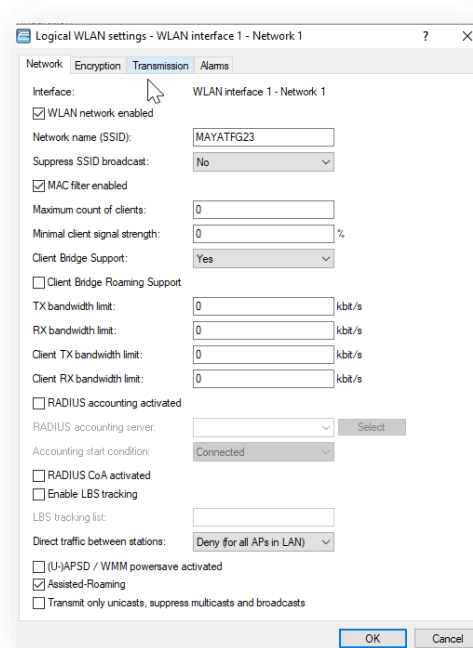


Figura 162 – Pestaña “Logical WLAN Settings>Network” de la configuración

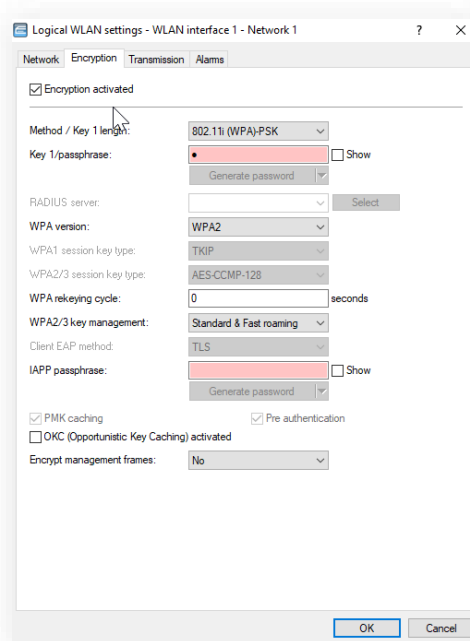


Figura 163 – Pestaña “Logical WLAN Settings>Encryption” de la configuración

En la pestaña “Transmission” se define el Intervalo de guarda (si se usa o no), el tamaño del paquete (byte), “frame aggregation” y unas opciones del fabricante llamadas STBC (Space Time Block Coding)/LDPC (Low Density Parity Check) para control de las tramas/bloques.



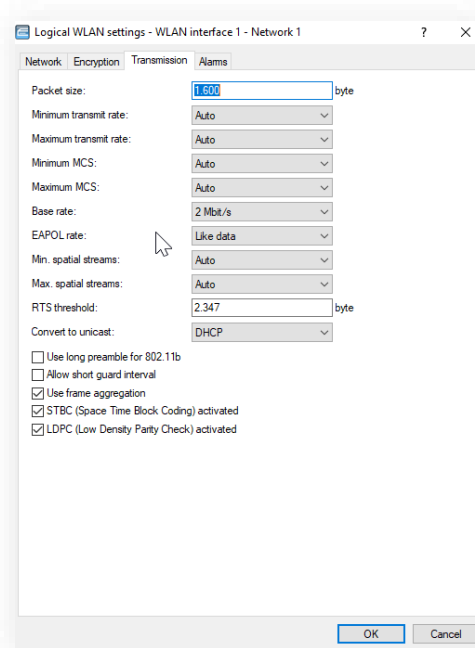


Figura 164 – Pestaña “Logical WLAN Settings>Transmission” de la configuración

La pestaña de “Alarmas” se mantiene configurada con los valores por defecto.

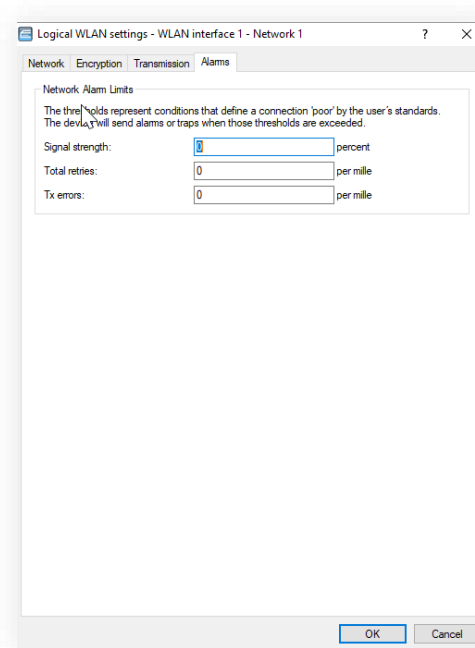


Figura 165 – Pestaña “Logical WLAN Settings>Alarms” de la configuración

- Configuration>Interfaces>LAN:** en esta pestaña se configura todo lo relacionado a la red: puertos de red que se van a usar y el modo *bridge* (por lo que la IP del puerto ethernet y la WLAN se comparten). En el caso del AP la configuración es modo bridge.

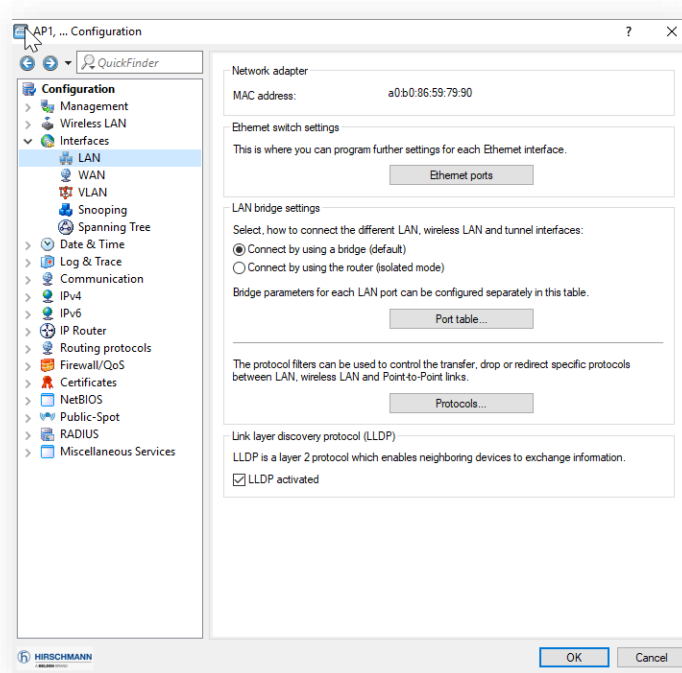


Figura 166 – Pestaña “Interfaces>LAN” de la configuración

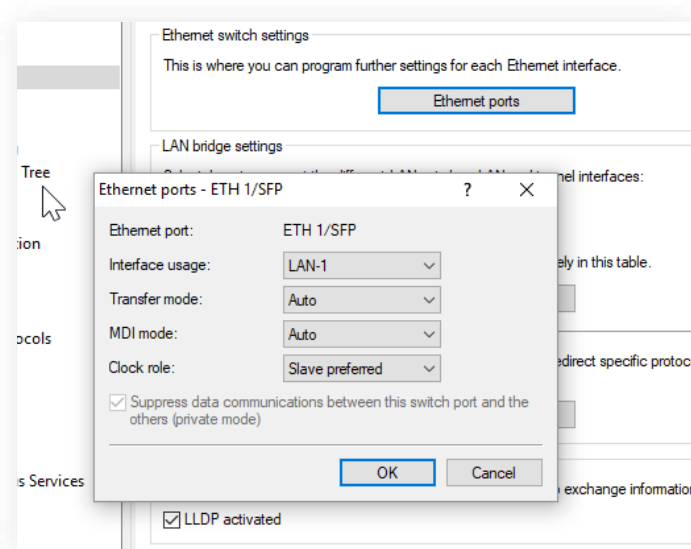


Figura 167 – Pestaña “LAN>Ethernet Ports>LAN1” de la configuración

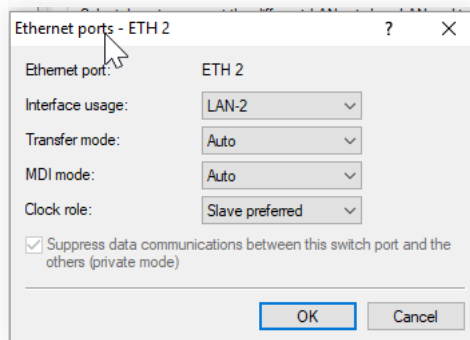


Figura 168 – Pestaña “LAN>Ethernet Ports>LAN2” de la configuración

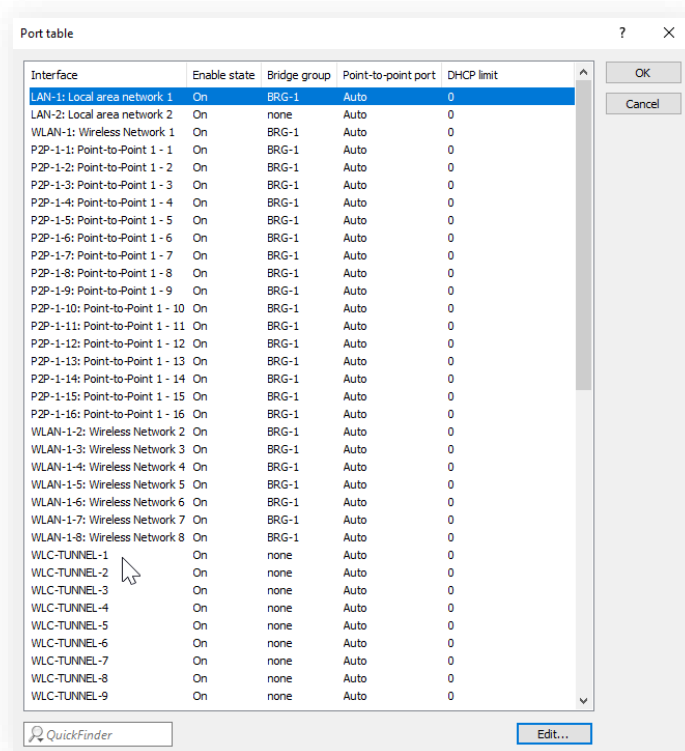


Figura 169 – Pestaña “LAN>Port Table” de la configuración

Tal y como se muestra en la Figura 169, hay un BRG-1 (*bridge*) definido entre LAN-1 y WLAN-1. Sin embargo, LAN-2 queda como un puerto con configuración IP independiente “none” (en caso de necesitarse).

- **Configuration>Ipv4>General:** en esta pestaña se definen los parámetros relativos a la IP, en el caso del punto de acceso se define la IP 192.168.1.14/24 y se indica el modo bridge “BRG-1” y se la nombra como INTRANET.

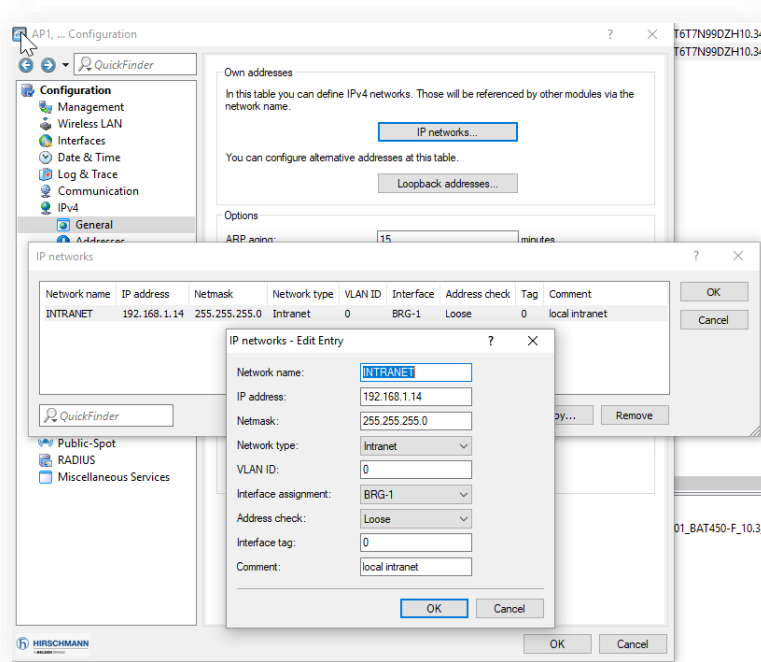


Figura 170 – Pestaña “IPv4>General>IP networks...” de la configuración

- **Configuration>IP Router>Routing:** en esta pestaña se configura todo lo relativo a enrutamiento del punto de acceso. Aquí es donde se indica el GW. Para la configuración de prueba punto a punto (estático) el GW será 192.168.1.12 (el cliente) para poder acceder al equipo PC de embarcado.

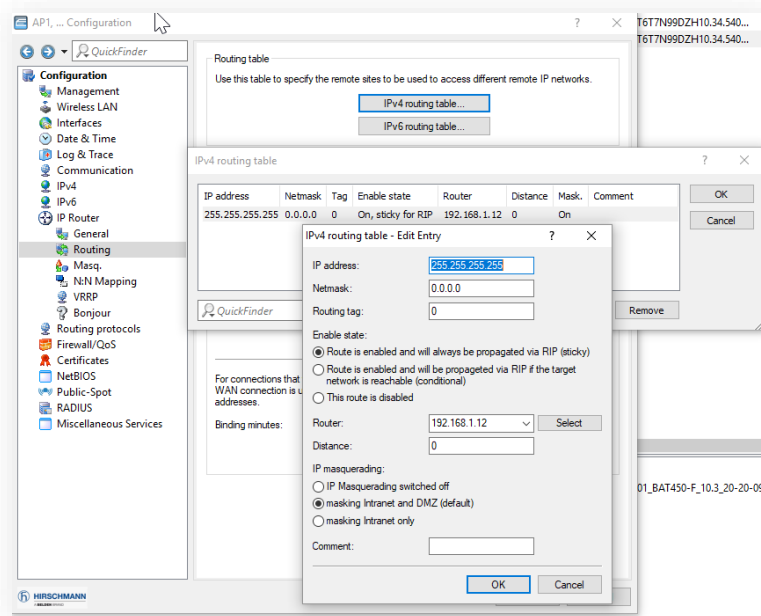


Figura 171 – Pestaña “Routing>Ipv4 Routing table...” de la configuración

- **Configuration>Firewall/QoS>General:** en esta pestaña se desactiva el firewall para que no interfiera con las pruebas.

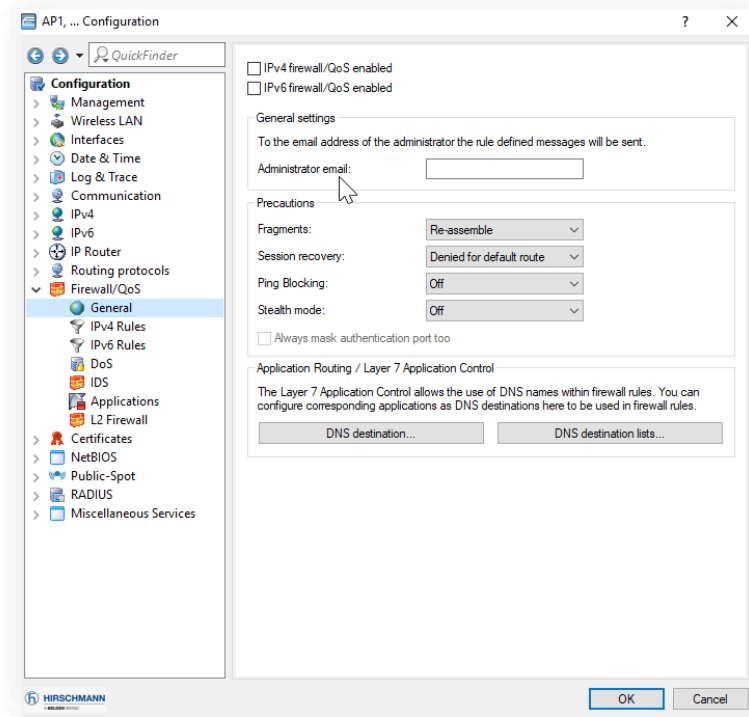


Figura 172 – Pestaña “Firewall/QoS>General” de la configuración

El resto de los parámetros se mantienen con valores por defecto del fabricante.

## 7.3.1.2. Configuración de Cliente

La configuración que se ha establecido para que el equipo funcione en modo cliente es la siguiente:

- **Configuration>Management>General:** aquí se establece el nombre del equipo, localización, Administrador y existen campos de texto para poder indicar otros comentarios. En el caso del cliente se configura como se muestra en la Figura 173:

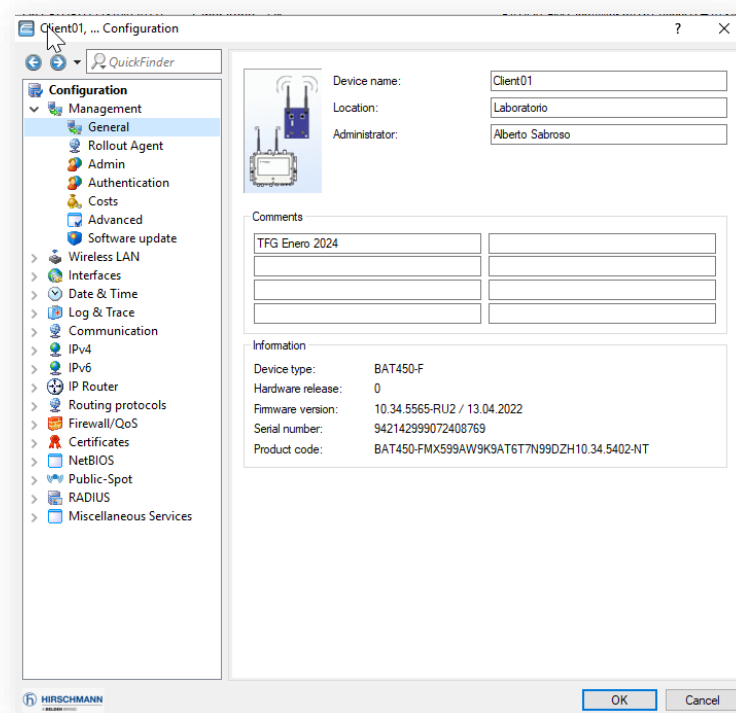


Figura 173 – Pestaña “Management>General” de la configuración

- **Configuration>Management>General:** se ha configurado la misma contraseña de acceso a la administración que para el punto de acceso, ver Figura 157.
- **Configuration>Wireless LAN>General:** se configura el equipo como “México” para el parámetro “Country” de cara a la operación.
- **Configuration>Wireless LAN>General>”Physical WLAN Settings”:** en la pestaña “Operation” se indica que el equipo va a funcionar como cliente, para ello el parámetro “WLAN Operation Mode” se establece en “Station”.



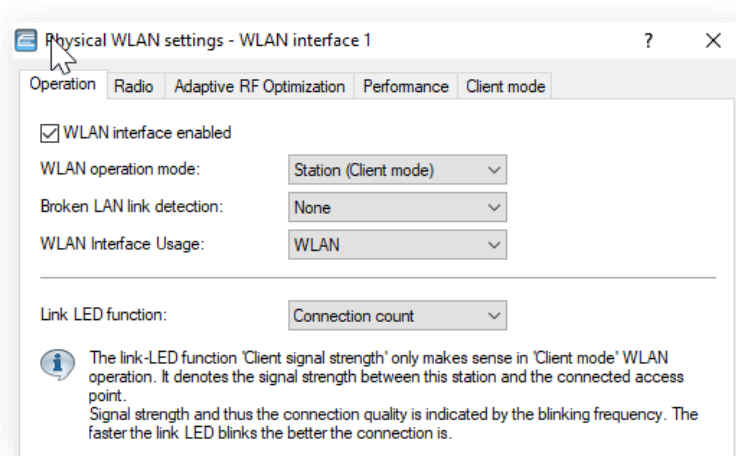


Figura 174 – Pestaña “Physical WLAN Settings>Operation” de la configuración

En la pestaña “Radio” se configuran los parámetros de operación idénticos a los usados en el punto de acceso: frecuencia 5660MHz, canal 132-136 y 40 MHz.

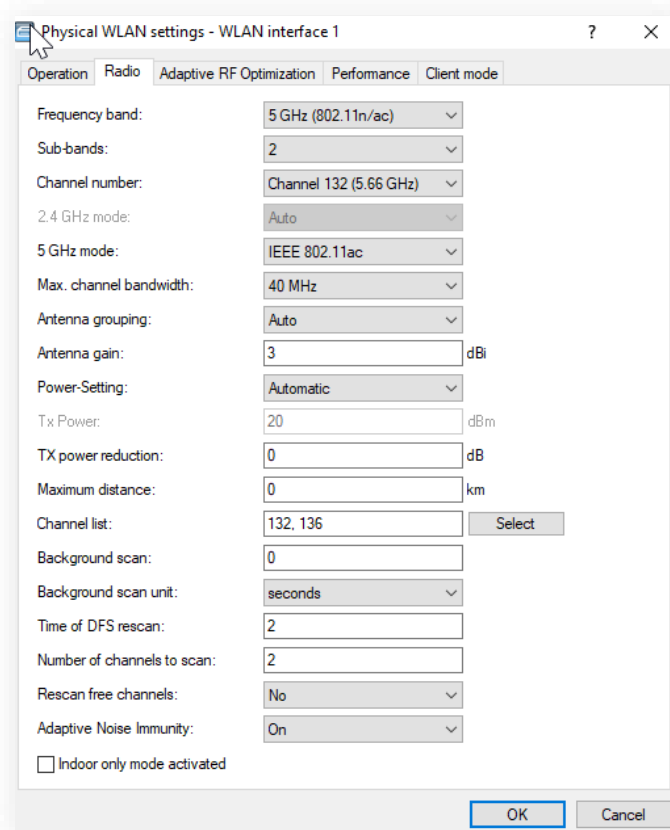


Figura 175 – Pestaña “Physical WLAN Settings>Radio” de la configuración

Al igual que en el caso del punto de acceso, y para las pruebas en estático, se mantienen las pestañas “Adaptative RF Operation” y “Performance” con los valores por defecto del fabricante, ver Figura 161.

Además, en este caso, como cliente, se modifica las opciones de la pestaña “Client Mode” para escanear sólo en la banda de 5GHz.

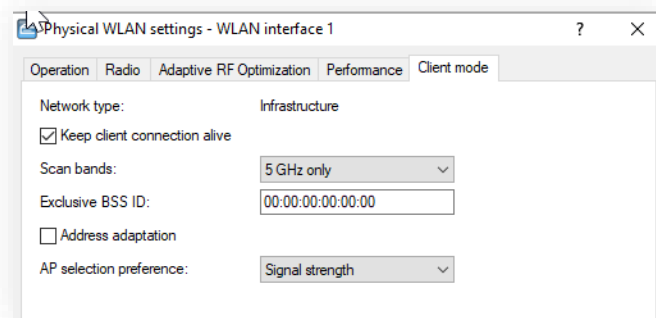


Figura 176 – Pestaña “Physical WLAN Settings>Client Mode” de la configuración

- Configuration>Wireless LAN>General>”Logical WLAN settings”**: en la pestaña “Network”, se configura el mismo SSID (MAYATFG23), y opciones, que para el punto de acceso (ver Figura 162). Para la pestaña “Encryption”, la contraseña y datos tienen los mismos valores (ver Figura 163). Por último, en las pestañas “Transmission” y “Alarms” se observan también los mismos parámetros (ver Figura 164 y Figura 165).
- Configuration>Interfaces>LAN**: en esta pestaña las opciones referentes al apartado “Ethernet ports” son idénticas a las del punto de acceso (LAN1 y LAN2). La principal modificación es que no está activo el modo *bridge*. Por lo que, la pestaña “Port table” queda con valor “none” en el campo “*bridge group*”. Esto indica que tanto en los puertos LAN-1/LAN-2 como en el puerto WLAN-1 se van a configurar redes diferentes (distintas IPs).

Interface	Enable state	Bridge group	Point-to-point port	DHCP limit
LAN-1: Local area network 1	On	none	Auto	0
LAN-2: Local area network 2	On	none	Auto	0
WLAN-1: Wireless Network 1	On	none	Auto	0
P2P-1-1: Point-to-Point 1 - 1	On	BRG-1	Auto	0
P2P-1-2: Point-to-Point 1 - 2	On	BRG-1	Auto	0
P2P-1-3: Point-to-Point 1 - 3	On	BRG-1	Auto	0
P2P-1-4: Point-to-Point 1 - 4	On	BRG-1	Auto	0
P2P-1-5: Point-to-Point 1 - 5	On	BRG-1	Auto	0
P2P-1-6: Point-to-Point 1 - 6	On	BRG-1	Auto	0
P2P-1-7: Point-to-Point 1 - 7	On	BRG-1	Auto	0
P2P-1-8: Point-to-Point 1 - 8	On	BRG-1	Auto	0
P2P-1-9: Point-to-Point 1 - 9	On	BRG-1	Auto	0
P2P-1-10: Point-to-Point 1 - 10	On	BRG-1	Auto	0

Figura 177 – Pestaña “LAN>Port table” de la configuración

- **Configuration>IPv4>General:** en la pestaña IP network, ya que no se ha establecido el equipo en modo *bridge*, se configuran 2 redes: LAN-2 con la IP 10.129.1.2/24 [INTRANET] y WLAN-1 con la 192.168.1.12/24 (WIRELESS).

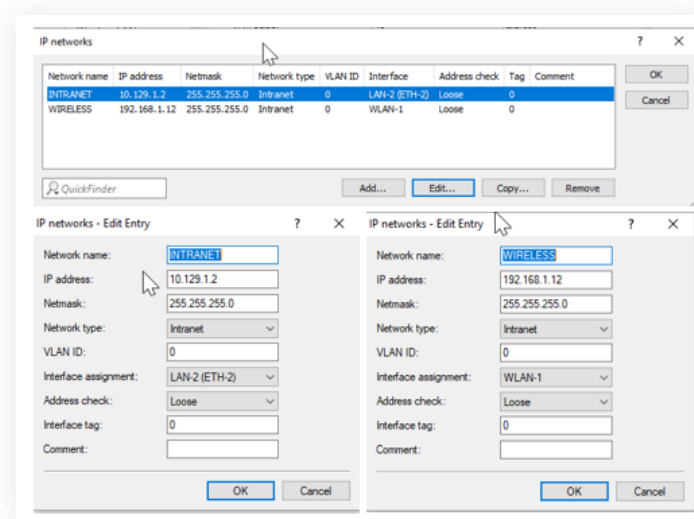


Figura 178 – Pestaña “IPv4>IP networks...” de la configuración

- **Configuration>IP Router>Routing:** en el caso del cliente no es necesario indicarle un enrutamiento, por lo tanto, queda vacío este valor. En esta prueba la conexión es punto a punto y no se necesita el *routing*.

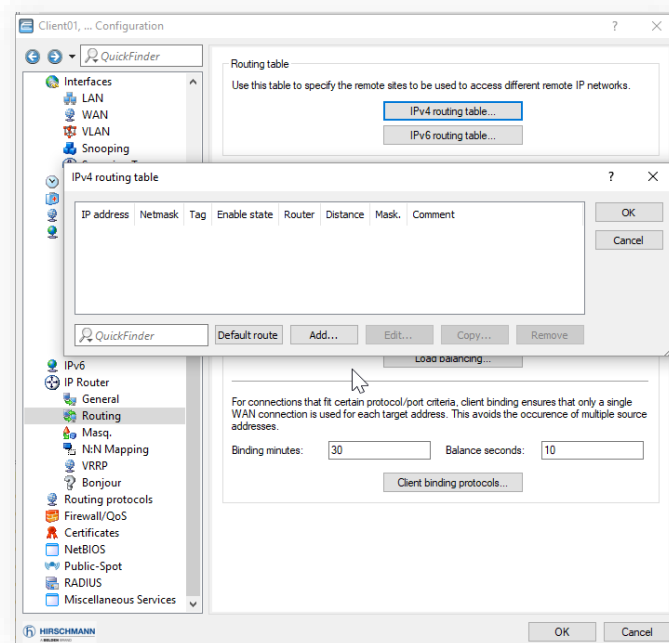


Figura 179 – Pestaña “IP Router>Routing>IPv4 routing table...” de la configuración

- **Configuration>Firewall/QoS>General:** en esta pestaña se desactiva el firewall para que no influya en las pruebas (ver Figura 172).

Llegados a este punto ya se encuentran configurados los equipos BATF-450 como punto de acceso y cliente.

## 7.4. Configuración de los equipos para pruebas dinámicas

### 7.4.1.1. Cambios en configuración de los puntos de acceso

En el caso de los puntos de acceso se han configurado los siguientes parámetros:

- **Configuration>Management>General:** aquí se establece el nombre del equipo, localización, administrador, etc. Además, existen campos de texto para poder indicar otros comentarios. A continuación, se muestran las configuraciones de AP1, AP2 y AP3:

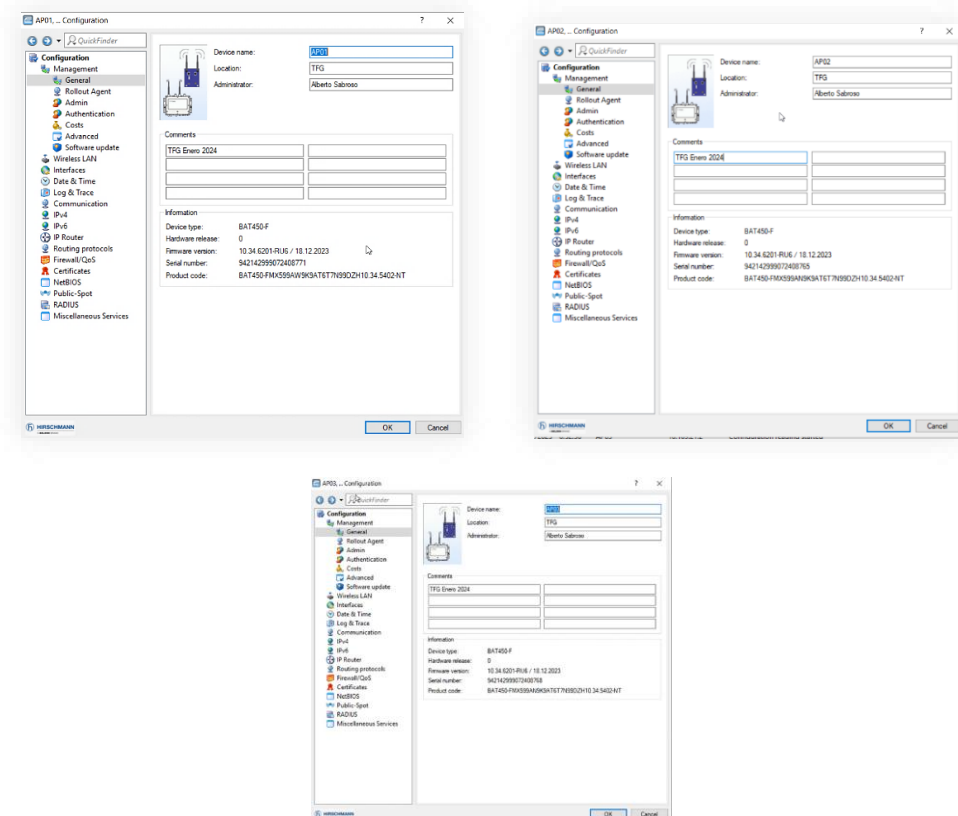


Figura 180 – Pestaña “General” de la configuración (AP1, AP2 y AP3)

- Configuration>Wireless LAN> Physical WLAN Settings – WLAN 1:** en esta pantalla se debe indicar las características radio del punto de acceso. Como se van a utilizar tres, y el ancho de banda del canal son 40MHz, se configuran los canales como: AP1-CH100, AP2-CH108 y AP3-CH132, tal y como muestra la Figura 181:

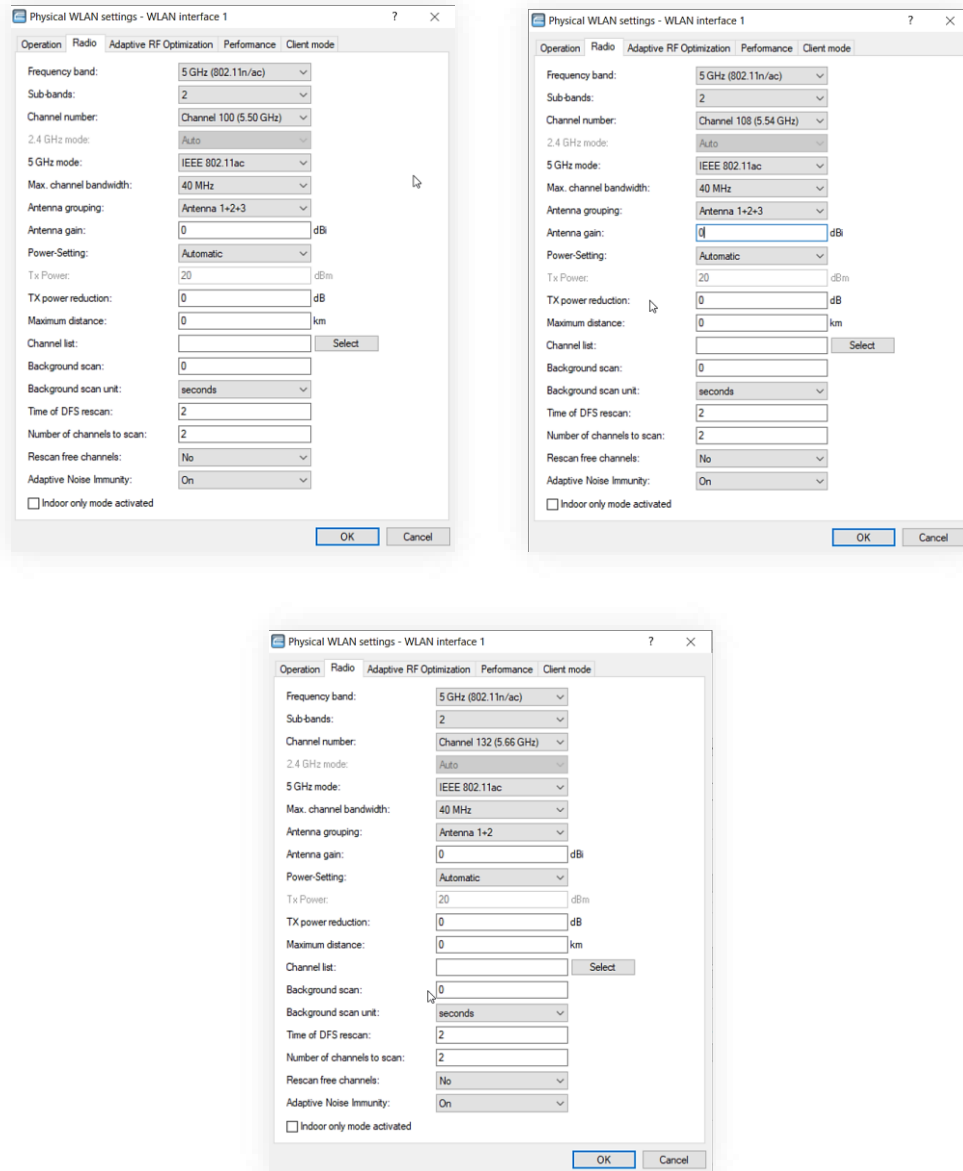


Figura 181 – Pestaña “Physical WLAN - Radio” de la configuración (AP1, AP2 y AP3)

En el caso del AP3, como en la antena 3 hay conectada una carga, se le indica el parámetro “Antenna grouping: 1+2”. De esta manera el equipo solo emite por 2 antenas: las conectadas a los conectores RF marcados como ANT1 y ANT2 (bocas 3 y 6 del atenuador variable).

- **Configuration>IPv4>General>IP networks:** en esta pestaña se define la dirección IP de los puntos de acceso, en modo *bridge* para que la IP de la interfaz WiFi y la *ethernet1* sean la misma:

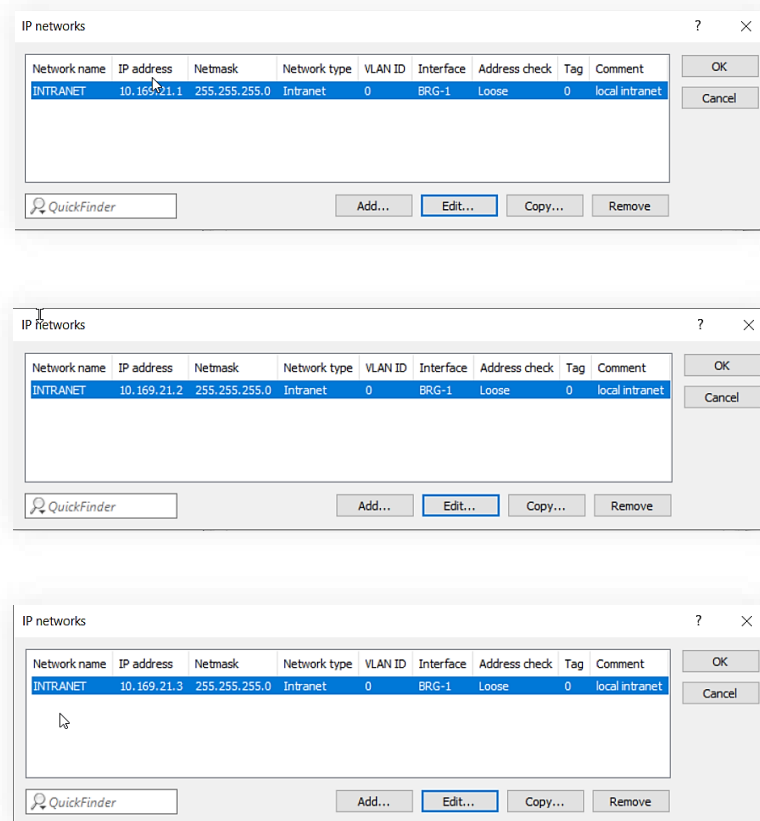


Figura 182 – Pestaña “IPv4>Ip networks” de la configuración (AP1, AP2 y AP3)

- **Configuration>IP Routing>Routing>IPv4 routing table:** en esta pestaña se define el *gateway* de red que se va a utilizar en el caso de tener que alcanzar otra red.

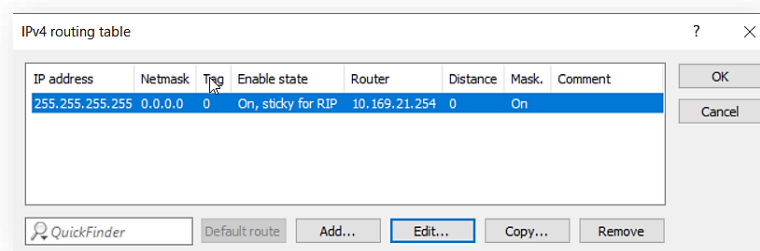


Figura 183 – Pestaña “IP Routing>IPv4 routing table” de la configuración

Con estos cambios en la configuración del punto de acceso, visto en el anexo 7.3.1.1, se tienen preparados los 3 equipos para las pruebas dinámicas en laboratorio.

## 7.4.1.2. Cambios en configuración del cliente

El cliente es el elemento que requiere mayor cantidad de modificaciones en la configuración, ya que es el encargado de evaluar el nivel de relación señal-ruido necesario para realizar *roaming* entre distintos puntos de acceso. Esta característica se explicará en profundidad más adelante.

En el caso del cliente se han configurado los siguientes parámetros:

- **Configuration>Management>General:** al igual que con el punto de acceso, esta pestaña sirve para nombrar el equipo y realizar anotaciones necesarios sobre la configuración aplicada. Para estas pruebas el equipo se ha nombrado como “OBM1, *OnBoard Modem 1*”:

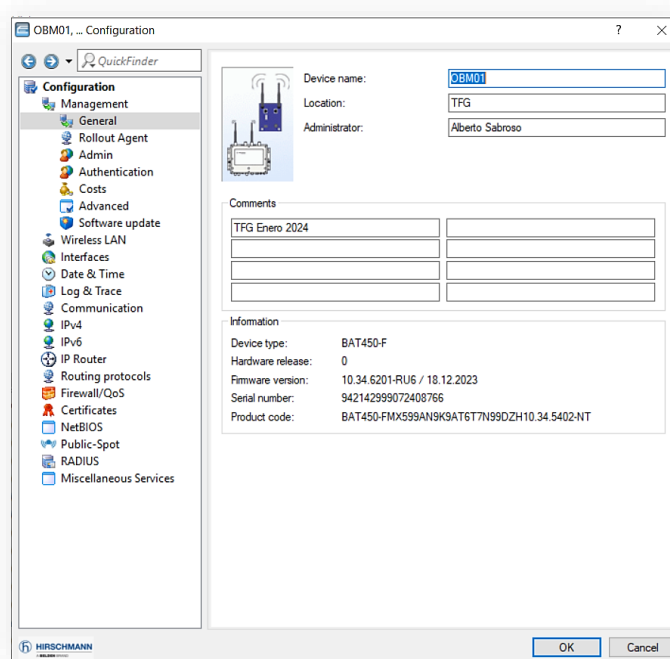


Figura 184 – Pestaña “Management>General” de la configuración

- **Configuration>Wireless LAN>Physical WLAN Settings>Radio:** en esta pestaña es donde se decide los canales que va a escanear el cliente en busca de puntos de acceso (*Channel list*), el tiempo de escaneo en segundo plano (cada cuanto tiempo el equipo va a iniciar un escaneo, *Background scan*), el grupo de antenas a utilizar (*Antenna grouping*) y el número del canal (*channel number*). En este caso el parámetro de número de canal se configura en automático para que el equipo pueda ir configurando su canal acorde al punto de acceso al que se conecta (y la lista de canales especificada). En cuanto al *background scanning*, si está vacío, o su valor



es cero, el equipo no escanea y, por lo tanto, las pruebas de *roaming* no se podrían realizar.

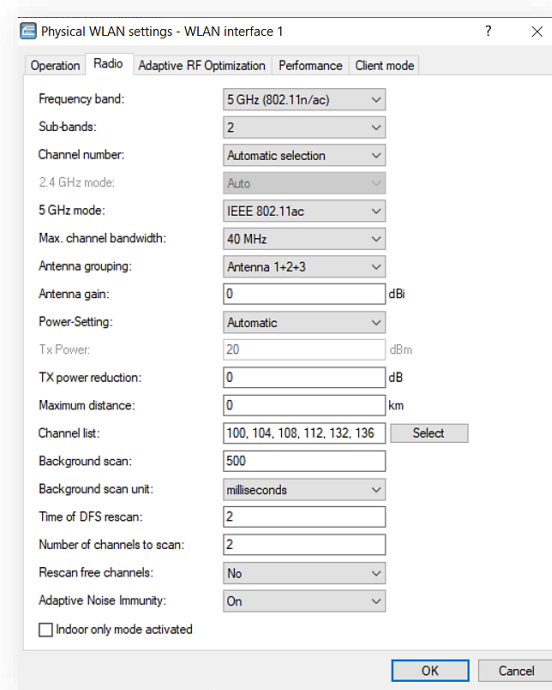


Figura 185 – Pestaña “WLAN>Physical WLAN settings – Radio” de la configuración

- **Configuration>Wireless LAN>Expert WLAN Settings:** en este apartado se deben configurar varias pestañas. La primera a modificar es la pestaña “Beaconing”. Los puntos de acceso emiten “beacons/balizas” para informar de su estado. Este parámetro es importante porque si es muy bajo puede existir saturación de la CPU del equipo por exceso de escaneos (esto implica que se pueden perder paquetes de datos e influir en el rendimiento del equipo). Además, si es muy largo el equipo tardaría mucho en recibir *beacons* con la información necesaria.

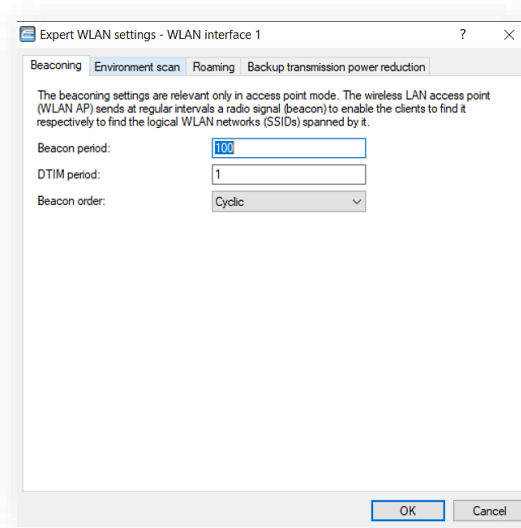


Figura 186 – Pestaña “Expert WLAN settings – Beaconing” de la configuración

La siguiente pestaña a configurar es la llamada “Roaming” y es de las configuraciones más importantes del cliente. Como se comentaba al inicio del apartado, aquí se indican los parámetros que el equipo debe evaluar para decidir cambiar el AP actual por uno más adecuado, normalmente uno con mejor nivel de señal.

Llegados a este punto se debe explicar cómo funcionan los distintos campos de la pestaña ya que modificando estos valores se realizarán distintas pruebas en los siguientes apartados.

Los parámetros que se pueden configurar son, ver el manual incluido en el apartado **7.2.1**:

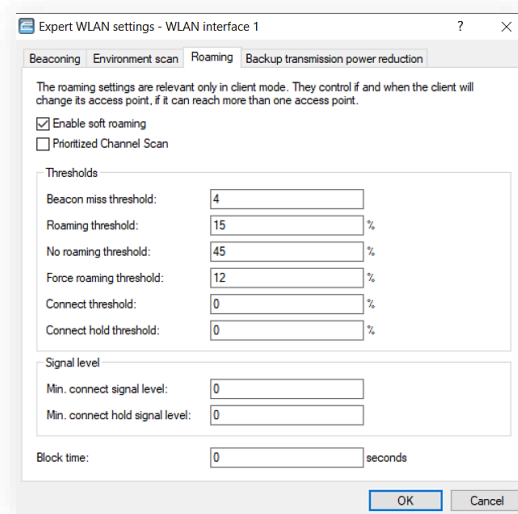


Figura 187 – Pestaña “Expert WLAN settings – Beacons” de la configuración

- **Enable soft roaming:** esta funcionalidad desarrollada por el cliente ayuda en la transición de un punto de acceso a otro de una manera más suave y sin cortes de conexión. Tal y como indica el manual si esta opción está deshabilitada la búsqueda en segundo plano, *background scan*, no se realiza por lo que el cliente sólo empieza a buscar otro punto de acceso cuando la conexión con el actual no es posible. Y existiría un hueco en la comunicación durante el escaneo.
- **Beacon miss threshold:** número de *beacons* que el cliente puede perder antes de comenzar a buscar otro punto de acceso. Un valor alto aumenta la probabilidad de no detectar correctamente una pérdida de conexión y, por lo tanto, un retraso en la reconexión. Por el contrario, un valor bajo puede provocar el efecto contrario y detectar un problema de conexión que en realidad no existe. Por defecto el fabricante lo configura a 4.
- **Roaming threshold:** este valor representa, en %, la diferencia en nivel de la señal (*signal strength*) del punto de acceso escaneado, respecto del actual, para cambiar a él.  
Es decir, cuánto mejor debe ser la señal del punto de acceso escaneado para que el cliente decida cambiar a él y desconectarse del punto de acceso al que está asociado.

El fabricante especifica unos valores de referencia:

- 100% -> 64dB
- 50% -> 32 dB
- 0% -> 0 dB

Por defecto está configurado al 15% (23-24 dB aproximadamente).

- **No roaming threshold:** este es el valor, en %, en el que el cliente debe empezar a escanear en busca de otros puntos de acceso (*soft roaming*). La idea es que a partir de este nivel se va a perder potencia de señal recibida por lo que debe encontrar un punto de acceso mejor al que asociarse.
- **Forced roaming threshold:** este valor, en %, indica que el nivel de señal es tan bajo que se hace necesario asociarse a otro punto de acceso de manera forzosa.

El resto de los parámetros vienen configurados por defecto a 0 y no influyen en las pruebas a realizar.

- **Configuration>IPv4>General>IP networks:** en esta pestaña se definen los parámetros de direcciones IP para el sistema. En el caso del cliente se configuran 2

direcciones de rangos distintos: una INTRANET para la eth1 y otra WIRELESS para la WLAN1.

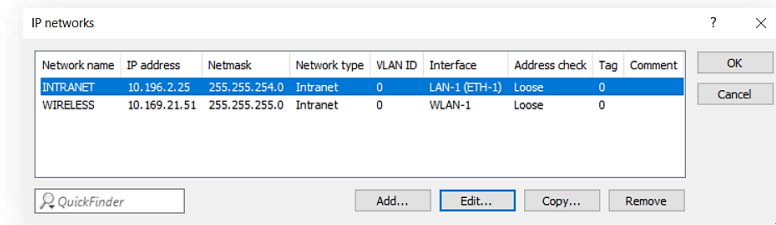


Figura 188 – Pestaña “IPv4>General>IP networks” de la configuración

- **Configuration>IP Routing>Routing>IPv4 routing table:** en esta pestaña se define el gateway de red que se va a utilizar en el caso de tener que alcanzar otra red.

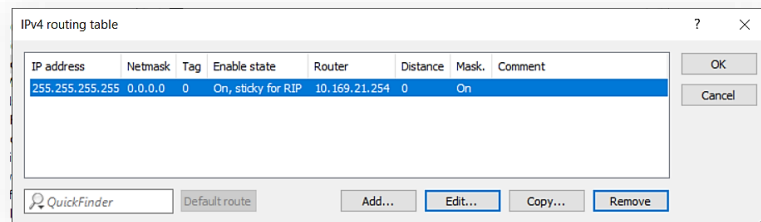


Figura 189 – Pestaña “Routing>IPv4 routing table” de la configuración

Llegados a este punto el equipo cliente OBM1 está correctamente configurado.

## 7.5. Resultado detallados de pruebas de *throughput* en estático

### 7.5.1.1. Equipos configurados con canales de 20 MHz

#### 1) MCS9

Tabla 41 – Tabla de datos del cliente para MCS9 20MHz

Atenuación	0 dB
Nivel de señal	-40dBm
Nivel de Ruido	-99dBm
SNR	59dB
MCS negociado en cliente	9
Data Rate	260 Mbit/s

Con estos datos el *throughput* conseguido es: mínimo 110Mbps, máximo 161Mbps y una media de **152 Mbps**, ver Figura 190.

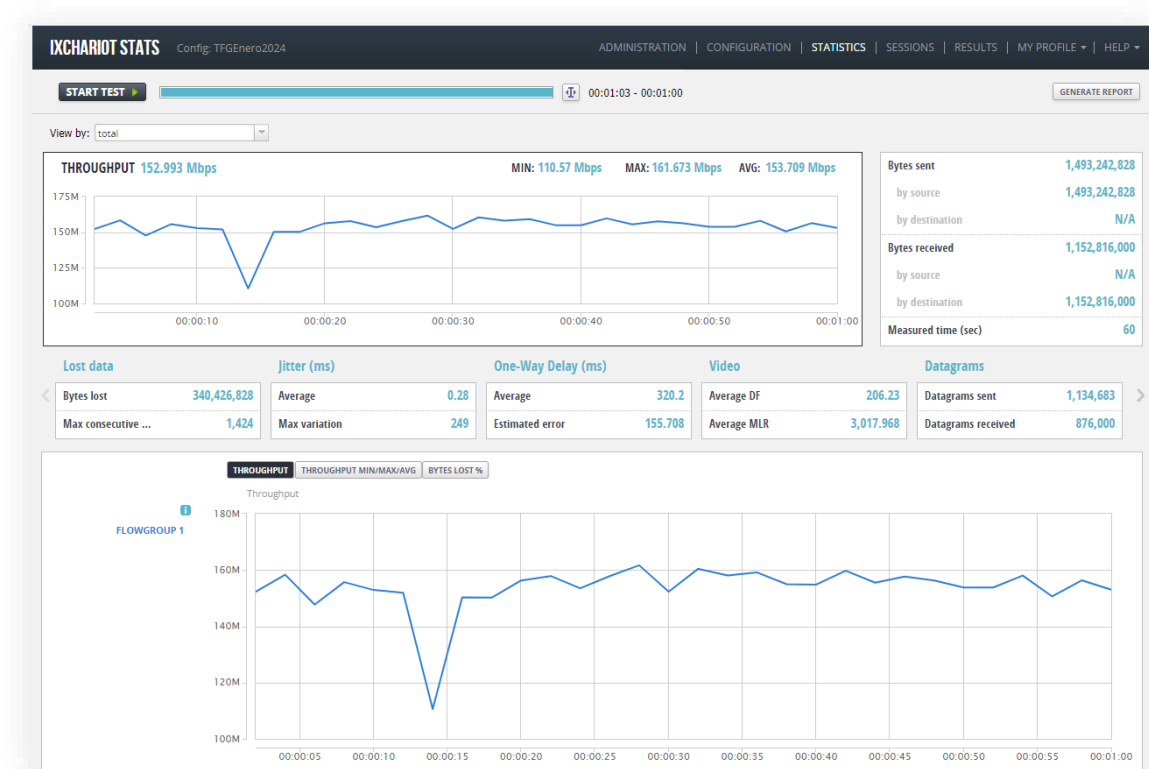


Figura 190 – Valores de *throughput* MCS9 20MHz

## 2) MCS8

Tabla 42 – Tabla de datos del cliente para MCS8 20MHz

Atenuación	10 dB
Nivel de señal	-50 dBm
Nivel de Ruido	-98 dBm
SNR	48 dB
MCS negociado en cliente	8
Data Rate	234 Mbit/s

Con estos datos el *throughput* conseguido es: mínimo 97 Mbps, máximo 158 Mbps y una media de **144 Mbps**, ver Figura 191.

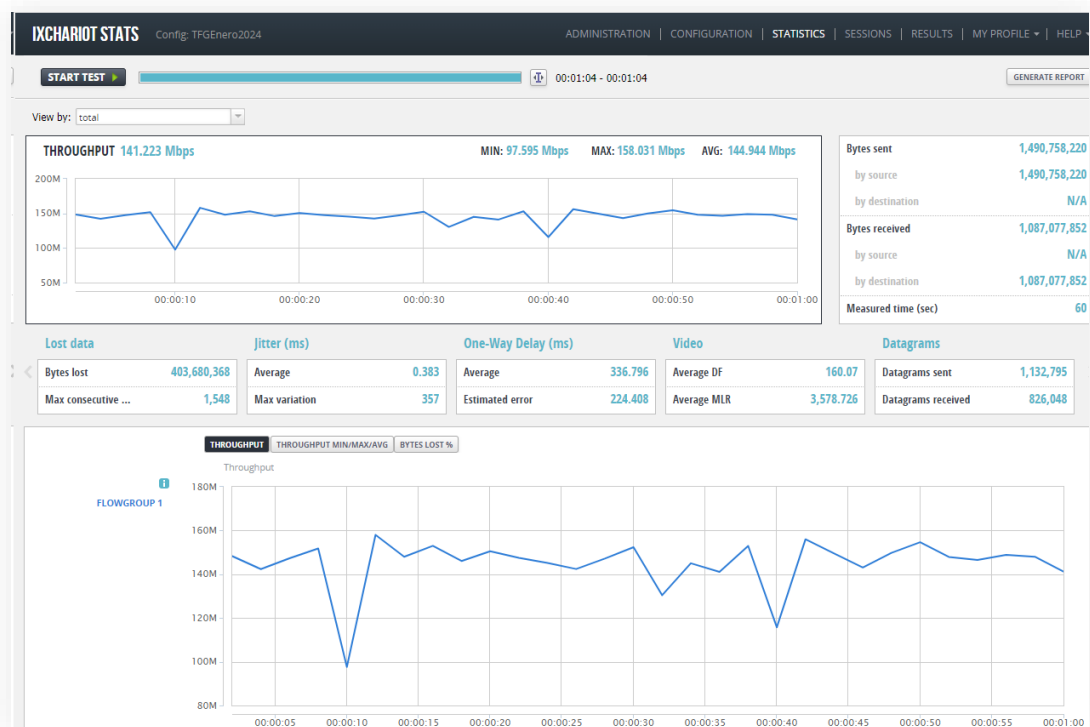


Figura 191 – Valores de throughput MCS8 20MHz

### 3) MCS6

Tabla 43 – Tabla de datos del cliente para MCS6 20MHz

Atenuación	20 dB
Nivel de señal	-60 dBm
Nivel de Ruido	-99 dBm
SNR	39 dB
MCS negociado en cliente	6
Data Rate	175 Mbit/s

Con estos datos el *throughput* conseguido es: mínimo 105 Mbps, máximo 121 Mbps y una media de **119 Mbps**, ver Figura 192.

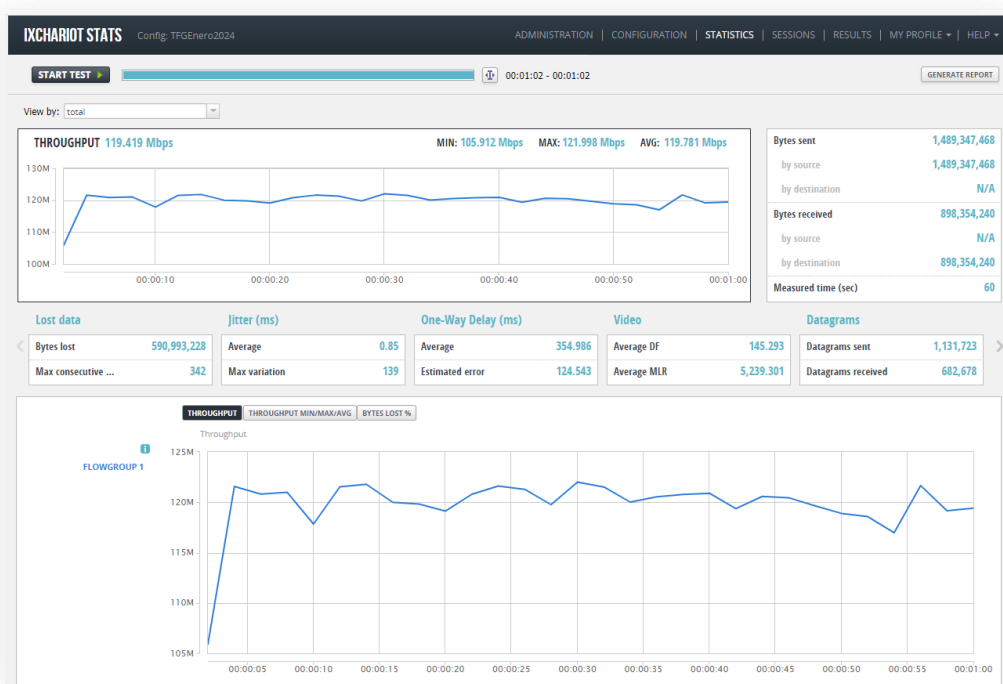


Figura 192 – Valores de throughput MCS6 20MHz



#### 4) MCS4

Tabla 44 – Tabla de datos del cliente para MCS4 20MHz

Atenuación	30 dB
Nivel de señal	-69 dBm
Nivel de Ruido	-100 dBm
SNR	31 dB
MCS negociado en cliente	4
Data Rate	117 Mbit/s

Con estos datos el *throughput* conseguido es: mínimo 82 Mbps, máximo 90 Mbps y una media de **88 Mbps**, ver Figura 193.

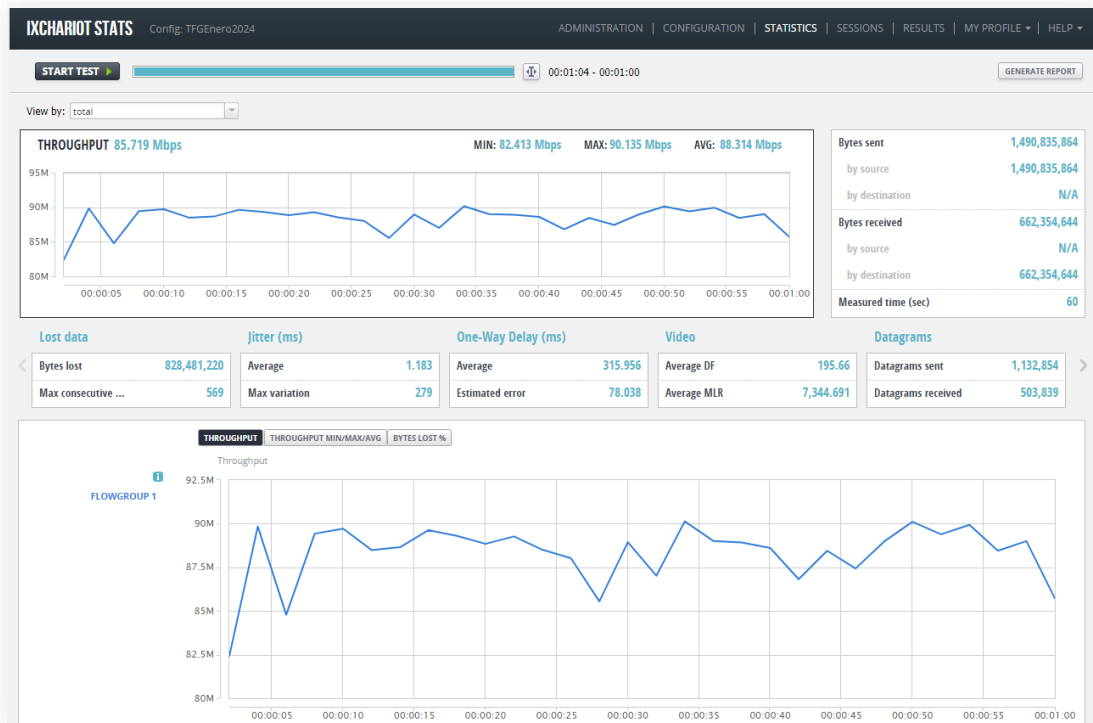


Figura 193 – Valores de throughput MCS4 20MHz

5) MCS2

Tabla 45 – Tabla de datos del cliente para MCS2 20MHz

Atenuación	40 dB
Nivel de señal	-72 dBm
Nivel de Ruido	-100 dBm
SNR	27 dB
MCS negociado en cliente	2
Data Rate	117 Mbit/s

Con estos datos el *throughput* conseguido es: mínimo 37 Mbps, máximo 46 Mbps y una media de **45 Mbps**, ver Figura 194.

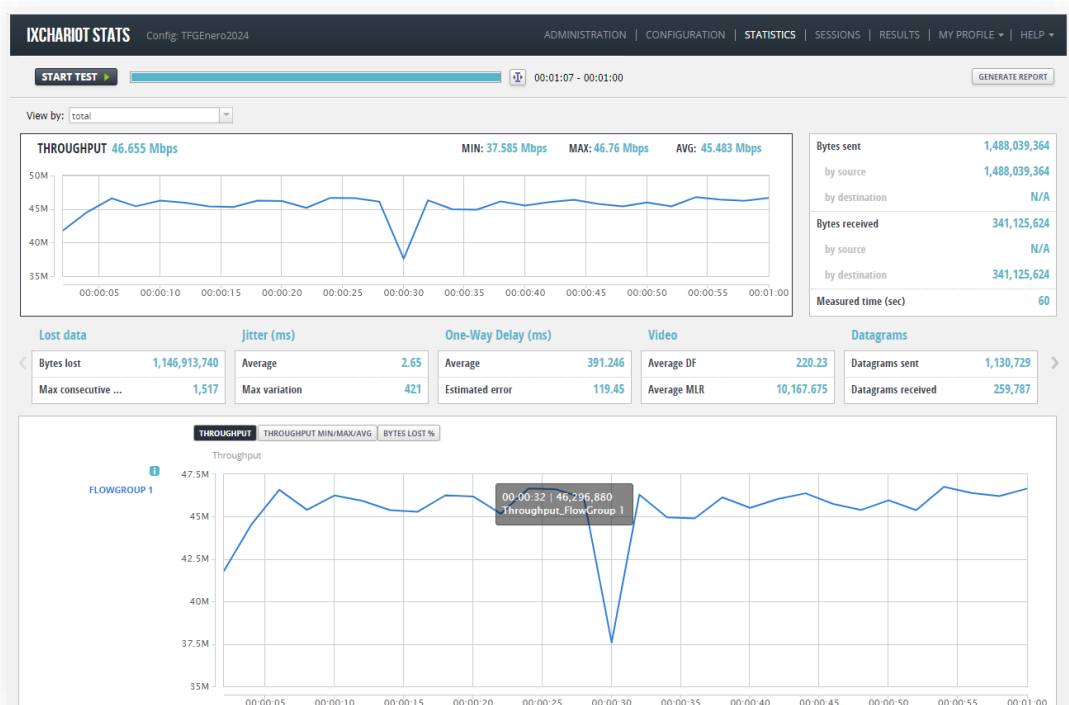


Figura 194 – Valores de throughput MCS2 20MHz

6) MCS1: no se ha conseguido atenuar lo suficiente la señal para alcanzar un MCS1.

## 7.5.1.2. Equipos configurados con canales de 40 MHz

1) MCS9:

Tabla 46 – Tabla de datos del cliente para MCS9 40MHz

Atenuación	0 dB
Nivel de señal	-43dBm
Nivel de Ruido	-98dBm
SNR	55dB
MCS negociado en cliente	9
Data Rate	260 Mbit/s

Con estos datos el *throughput* conseguido es: mínimo 111Mbps, máximo 172Mbps y una media de **159 Mbps**, ver Figura 195.

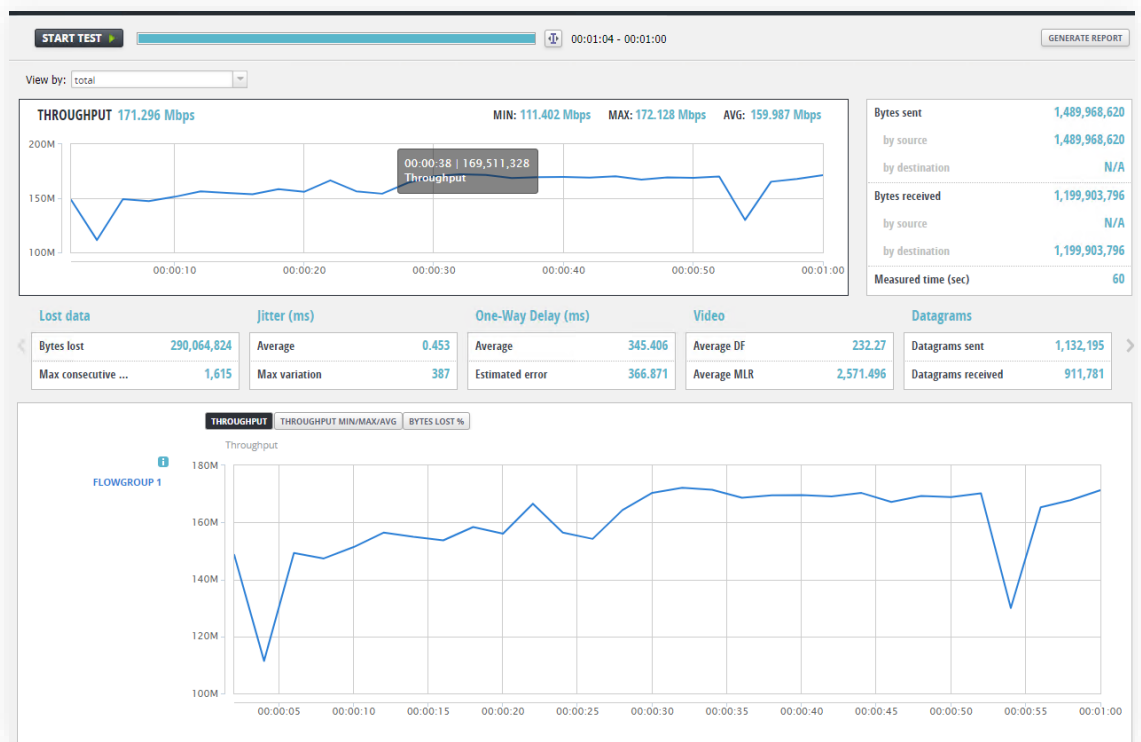


Figura 195 – Valores de throughput MCS9 40MHz

2) MCS8:

Tabla 47 – Tabla de datos del cliente para MCS8 40MHz

Atenuación	10 dB
Nivel de señal	-54dBm
Nivel de Ruido	-100dBm
SNR	46 dB
MCS negociado en cliente	8
Data Rate	234 Mbit/s

Con estos datos el *throughput* conseguido es: mínimo 135 Mbps, máximo 160 Mbps y una media de **146 Mbps**, ver Figura 196.

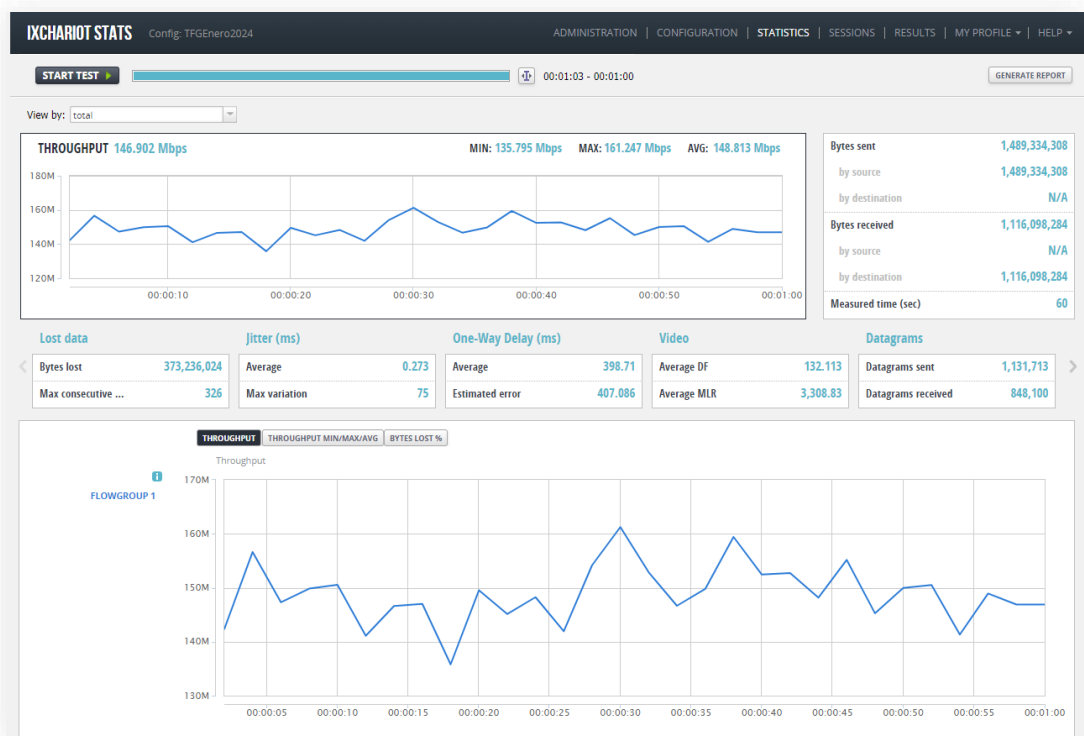


Figura 196 – Valores de throughput MCS8 40MHz

### 3) MCS6:

Tabla 48 – Tabla de datos del cliente para MCS6 40MHz

Atenuación	20 dB
Nivel de señal	-60dBm
Nivel de Ruido	-100dBm
SNR	40 dB
MCS negociado en cliente	6
Data Rate	175 Mbit/s

Con estos datos el *throughput* conseguido es: mínimo 132 Mbps, máximo 161 Mbps y una media de **148 Mbps**, ver Figura 197.

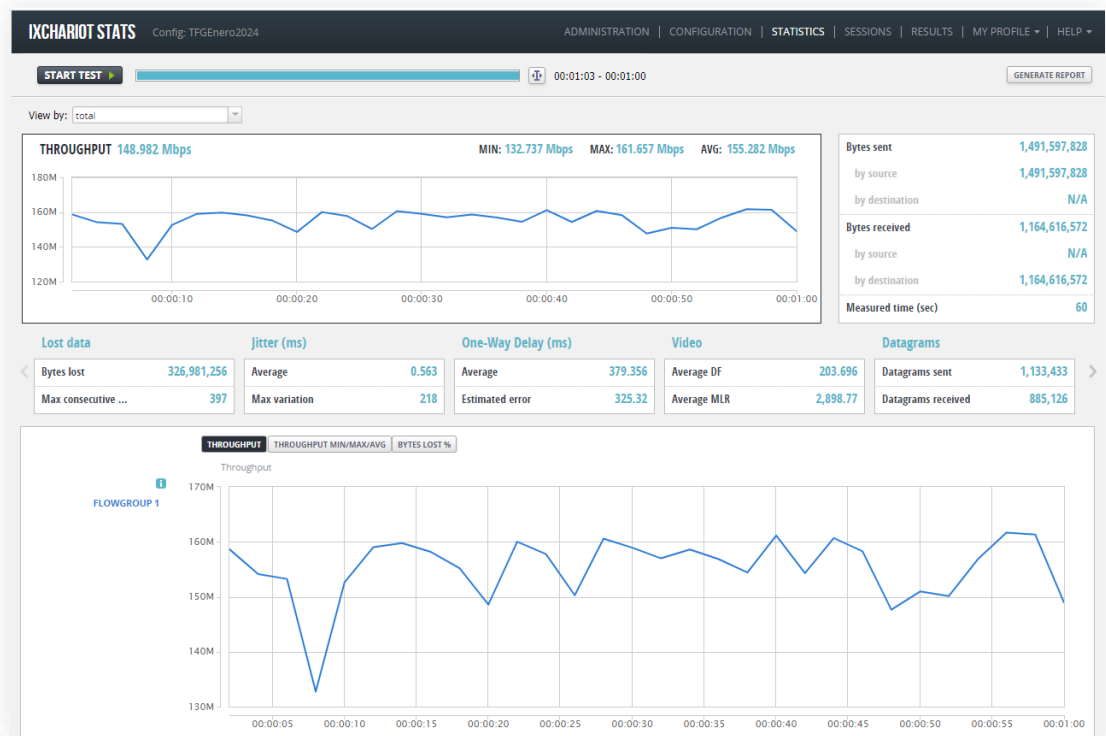


Figura 197 – Valores de throughput MCS6 40MHz

4) MCS4:

Tabla 49 – Tabla de datos del cliente para MCS4 40MHz

Atenuación	30 dB
Nivel de señal	-69dBm
Nivel de Ruido	-100dBm
SNR	31 dB
MCS negociado en cliente	4
Data Rate	117 Mbit/s

Con estos datos el *throughput* conseguido es: mínimo 132 Mbps, máximo 168 Mbps y una media de **162 Mbps**, ver Figura 198.

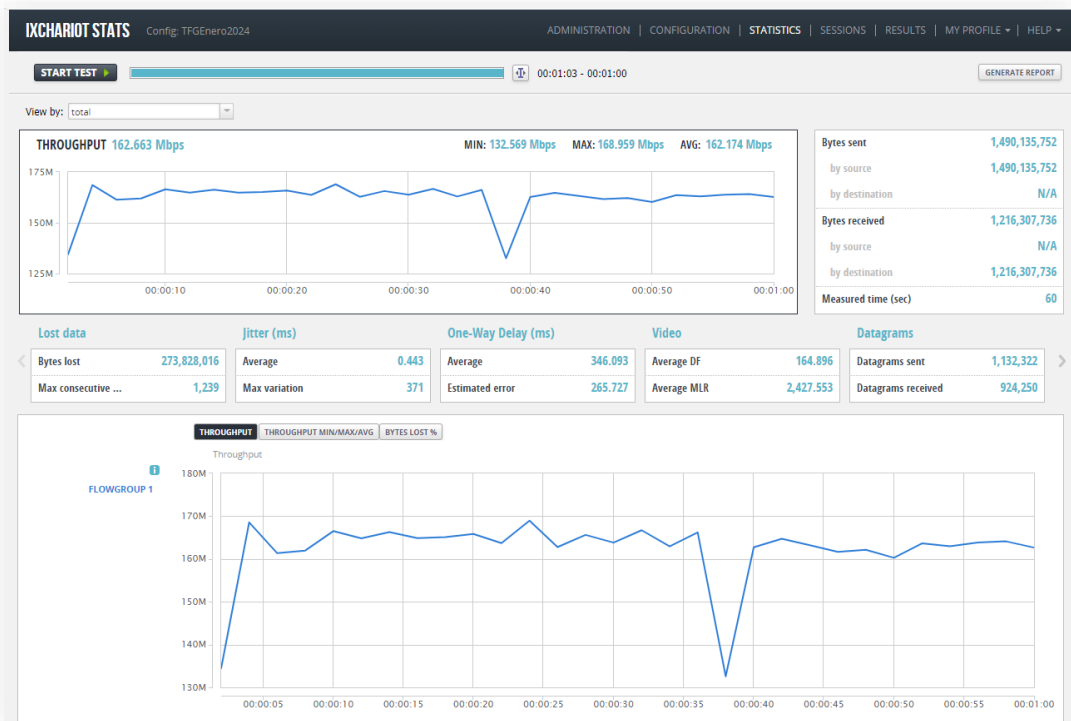


Figura 198 – Valores de throughput MCS4 40MHz

5) MCS2:

Tabla 50 – Tabla de datos del cliente para MCS2 40MHz

Atenuación	40 dB
Nivel de señal	-76dBm
Nivel de Ruido	-102dBm
SNR	26 dB
MCS negociado en cliente	2
Data Rate	58,5 Mbit/s

Con estos datos el *throughput* conseguido es: mínimo 76 Mbps, máximo 98 Mbps y una media de **97 Mbps**, ver Figura 199.

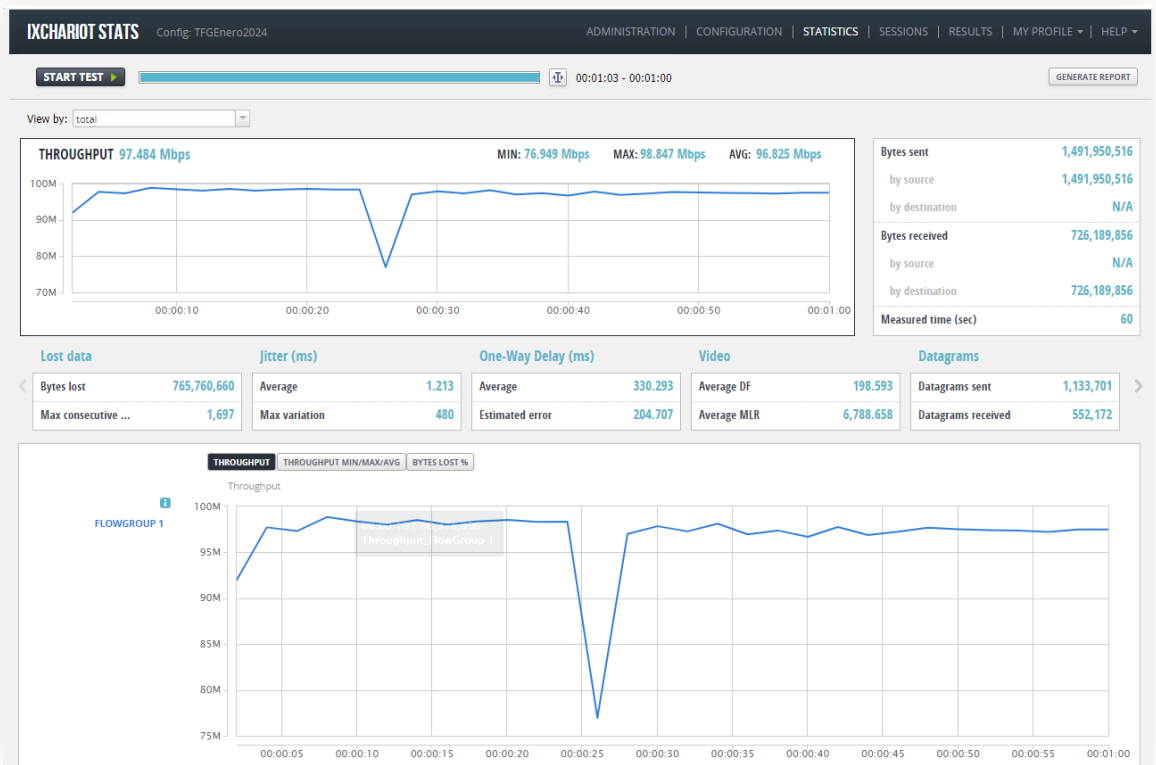


Figura 199 – Valores de throughput MCS2 40MHz

6) MCS1: no se ha conseguido atenuar lo suficiente la señal para alcanzar un MCS1.



### 7.5.1.3. Equipos configurados con canales de 80 MHz

Para las pruebas a 80MHz se tiene que usar el canal 122 que es que tiene la frecuencia más alta (ver Figura 57). Para ello, en la configuración, se ha configurado el primer canal de 20MHz (116) y al indicar que el ancho de banda del canal es de 80Mhz, el equipo empieza a trabajar sumando los canales: 116, 120, 124 y 128.

Por lo que la frecuencia de uso abarca desde los 5570 hasta los 5650 MHz.

1) MCS9:

Tabla 51 – Tabla de datos del cliente para MCS9 80MHz

Atenuación	0 dB
Nivel de señal	-40dBm
Nivel de Ruido	-101dBm
SNR	61dB
MCS negociado en cliente	9
Data Rate	1170 Mbit/s

Con estos datos el *throughput* conseguido es: mínimo 8 Mbps (desvanecimiento), máximo 192Mbps y una media de **152 Mbps**, ver Figura 200.

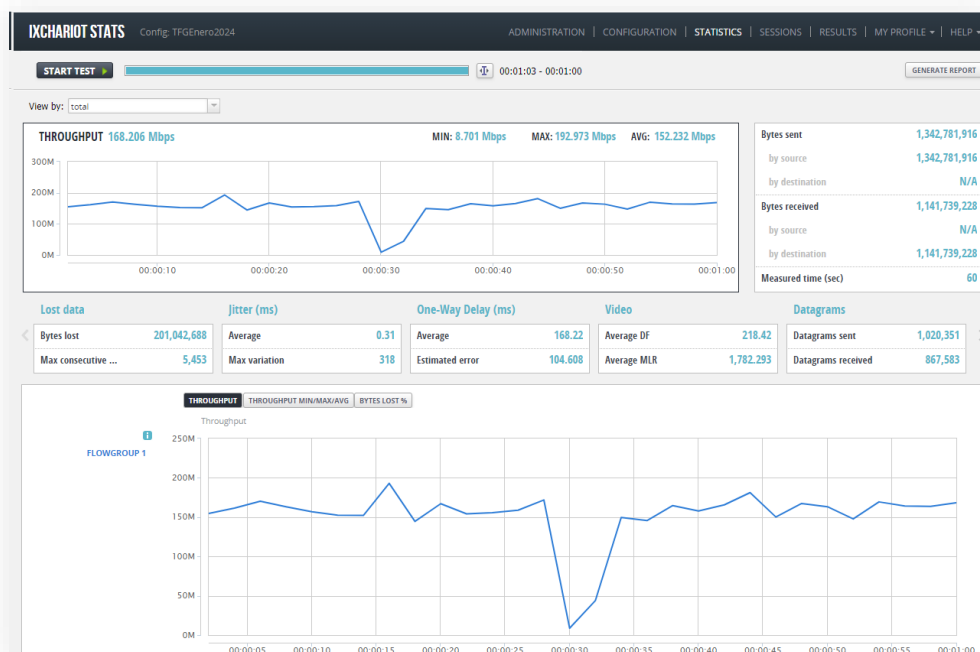


Figura 200 – Valores de throughput MCS9 80MHz

2) MCS8:

Tabla 52 – Tabla de datos del cliente para MCS8 80MHz

Atenuación	10 dB
Nivel de señal	-50dBm
Nivel de Ruido	-101dBm
SNR	51dB
MCS negociado en cliente	8
Data Rate	1053 Mbit/s

Con estos datos el *throughput* conseguido es: mínimo 135 Mbps, máximo 168Mbps y una media de **168 Mbps**, ver Figura 201.

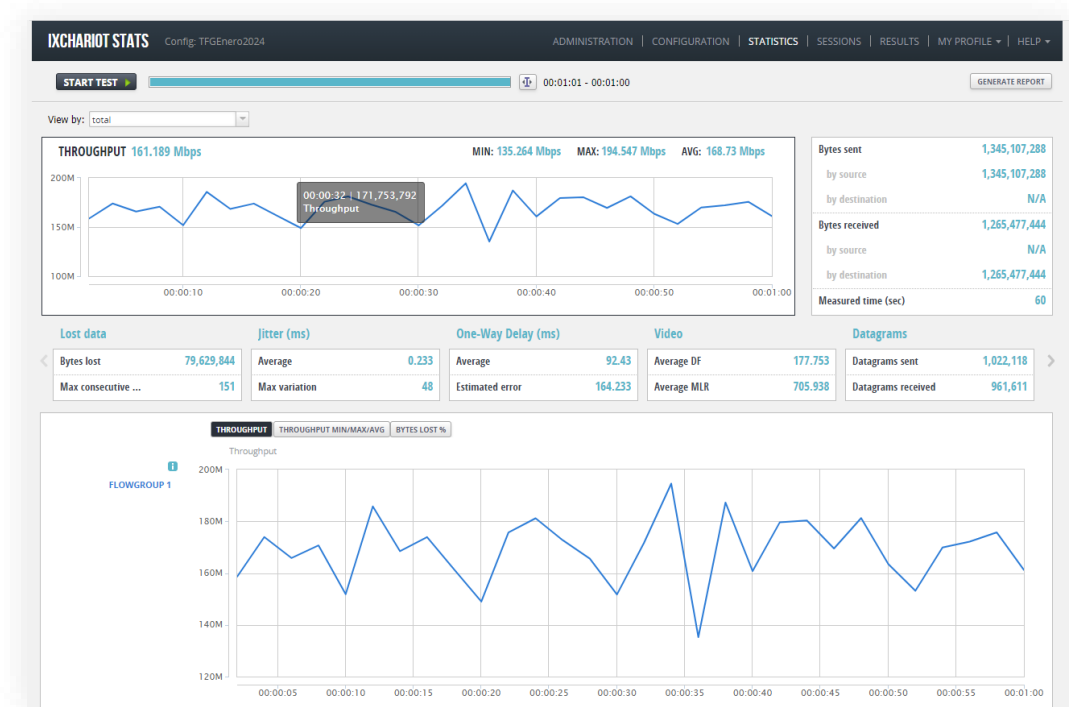


Figura 201 – Valores de throughput MCS8 80MHz

3) MCS6:

Tabla 53 – Tabla de datos del cliente para MCS6 80MHz

Atenuación	20 dB
Nivel de señal	-58dBm
Nivel de Ruido	-101dBm
SNR	43dB
MCS negociado en cliente	6
Data Rate	877 Mbit/s

Con estos datos el *throughput* conseguido es: mínimo 143 Mbps, máximo 188Mbps y una media de **166 Mbps**, ver Figura 202.

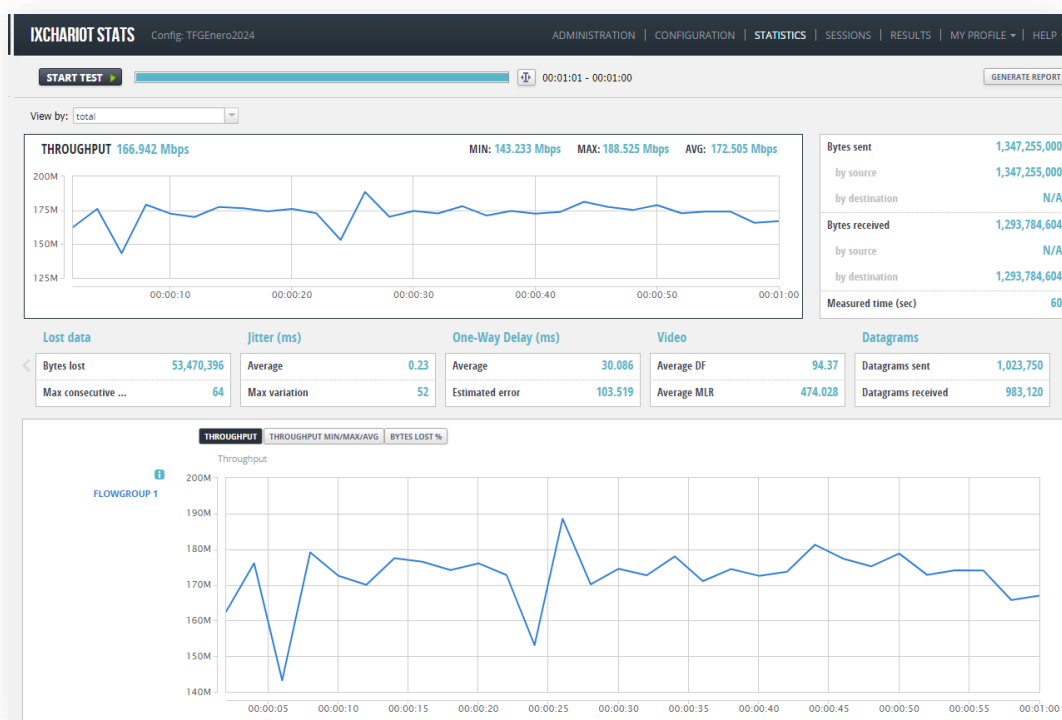


Figura 202 – Valores de throughput MCS6 80MHz

4) MCS4:

Tabla 54 – Tabla de datos del cliente para MCS4 80MHz

Atenuación	30 dB
Nivel de señal	-69dBm
Nivel de Ruido	-100dBm
SNR	31dB
MCS negociado en cliente	4
Data Rate	526 Mbit/s

Con estos datos el *throughput* conseguido es: mínimo 164 Mbps, máximo 179Mbps y una media de **179 Mbps**, ver Figura 203.

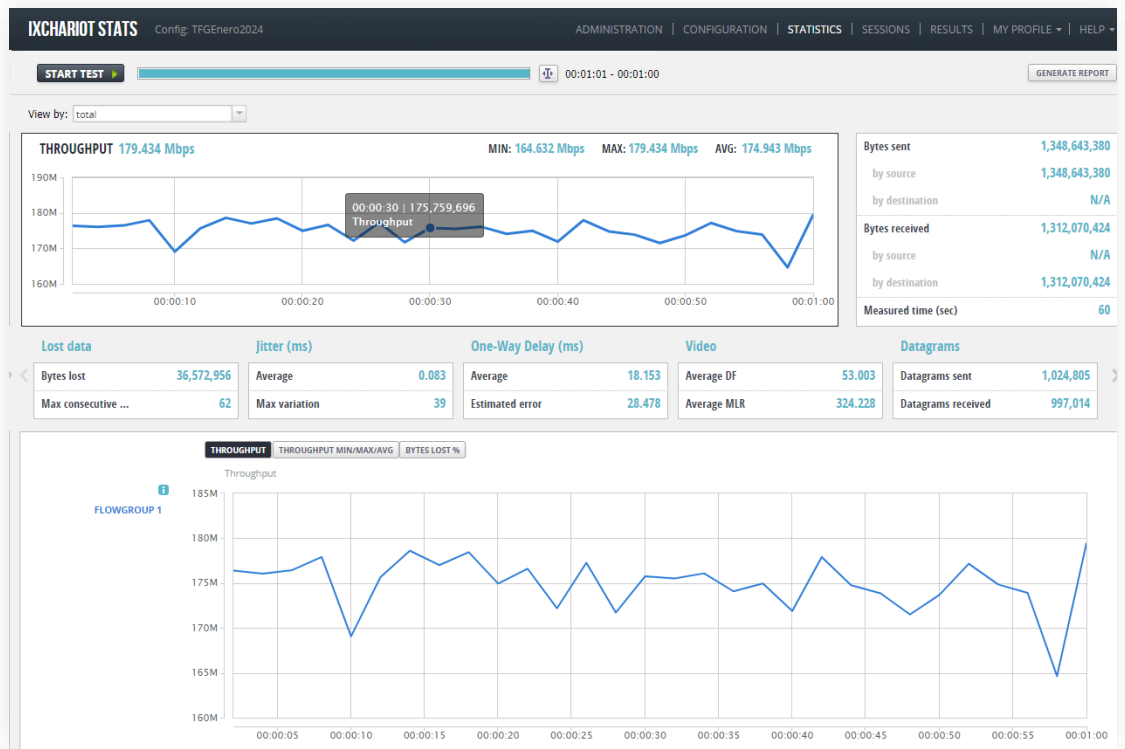


Figura 203 – Valores de throughput MCS4 80MHz

5) MCS2:

Tabla 55 – Tabla de datos del cliente para MCS2 80MHz

Atenuación	40 dB
Nivel de señal	-78dBm
Nivel de Ruido	-101dBm
SNR	23dB
MCS negociado en cliente	2
Data Rate	263 Mbit/s

Con estos datos el *throughput* conseguido es: mínimo 152 Mbps, máximo 183Mbps y una media de **178 Mbps**, ver Figura 204.

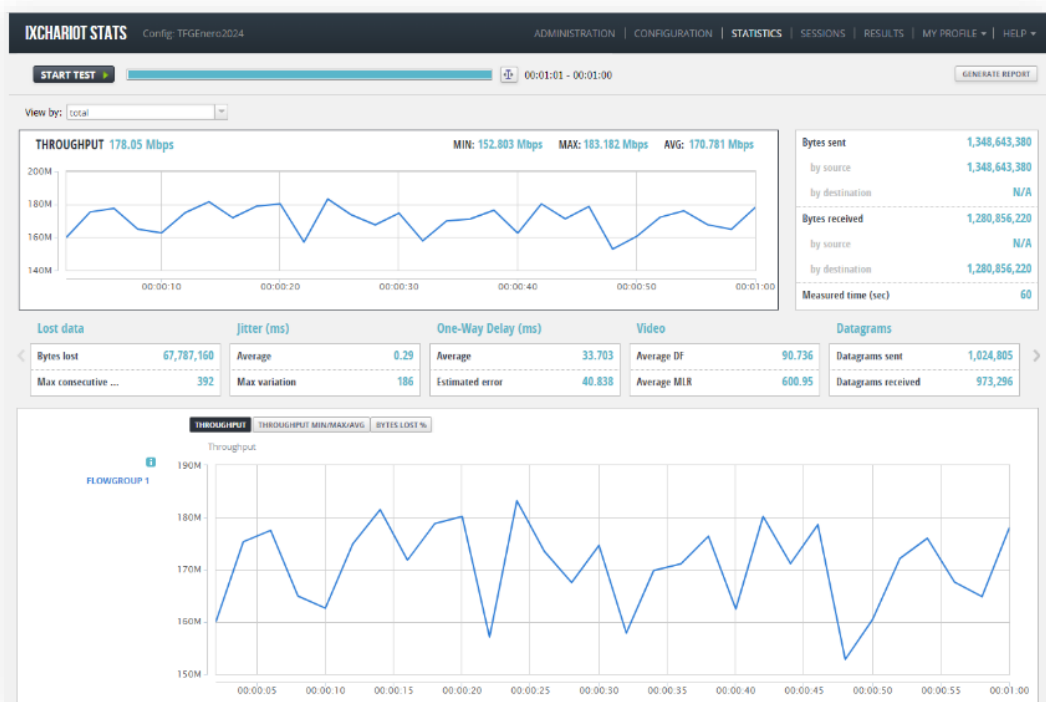


Figura 204 – Valores de throughput MCS2 80MHz

Como se puede ver en los pruebas de 80 MHz al usar 4 canales de 20MHz el *throughput*, cuando el nivel de señal recibida es bajo, es mayor que en 40MHz y 20MHz. Otra de las cosas llamativas es que el límite máximo de tasa de transferencia está en torno a los 170 Mbps. Esta limitación es debida a la CPU del BAT-450F. Por lo tanto, **no se puede conseguir una velocidad de transferencia mayor**. Este dato ha sido contrastado con el fabricante ya que el equipo es una actualización a nivel firmware del equipo que se usaba con el estándar 802.11n.

## 7.6. Resultados detallados sobre pruebas de *throughput* en dinámico

### 7.6.1.1. Test 1 – Roaming a 45% y Force a 12%

Para este test se ha utilizado el escenario de atenuación 1, ver Figura 113 y la configuración siguiente (valores por defecto del fabricante):

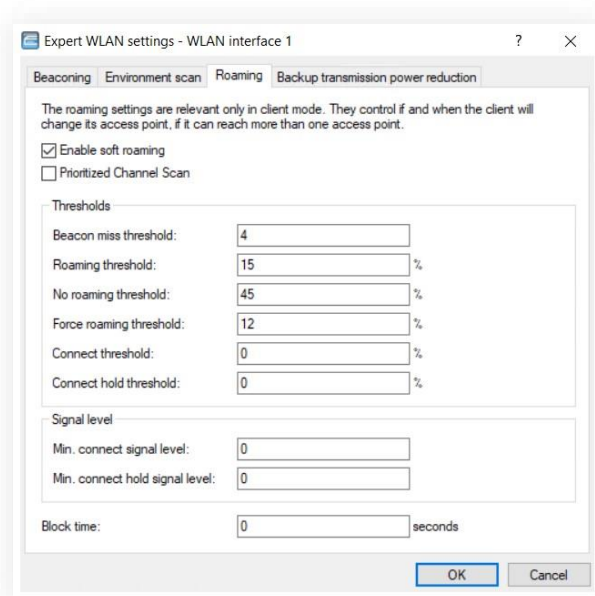


Figura 205 – Parámetros de configuración para OBM1 según test1

Estos valores se corresponden con los siguientes niveles de señal:

Tabla 56 – Equivalencia de % a dB/dBm en test1

	Test1 (%)	dB	Signal (dBm)
Roaming threshold	15	9,6	
No roaming threshold	45	28,8	-71,2
Force roaming threshold	12	7,68	-92,32
	escenario 1		

A continuación, se adjunta un pantallazo resumen con los resultados de la prueba:

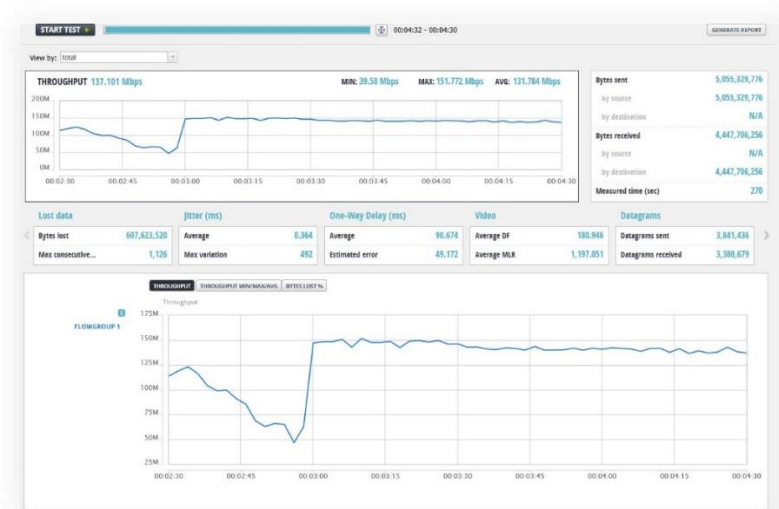


Figura 206 – Resumen throughput para test1

Como se puede observar en la Figura 206, en las pruebas de *roaming* del test1 se ha alcanzado:

- Un máximo de 151 Mbps.
- Un mínimo de 39 Mbps.
- Una media de 131 Mbps.

Si se observa la gráfica del *throughput* de la prueba completa:

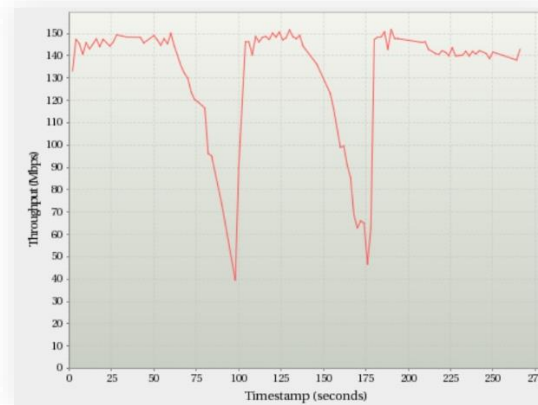


Figura 207 – Gráfica de throughput para test1

En la Figura 207 se pueden observar los 2 *roamings* que ejecuta el cliente:

- AP1>AP2: la tasa de transferencia cae a casi 40Mbps, pero no se corta la conexión por lo que el efecto es el esperado dado los valores por defecto del equipo (el *roaming* se produce en los niveles de señal desde -72 dBm a -92dBm).
- AP2>AP3: aquí la tasa de transferencia es un poco mejor, entre 40-50 Mbps, pero el comportamiento es similar.



### 7.6.1.2. Test 2 – Roaming a 50% y Force a 12%

Para este test se ha utilizado el escenario de atenuación 1 (ver Figura 113). La configuración se ha modificado (aumentado el *roaming threshold* a 8% y el *no roaming threshold* a 50%). Por lo tanto, queda como:

- *Roaming threshold*: 8%
- *No roaming threshold*: 50%
- *Force romaing thershold*: 12%

Estos valores se corresponden con los siguientes niveles de señal:

Tabla 57 – Equivalencia de % a dB/dBm en test2

	Test2 (%)	dB	Signal (dBm)
Roaming threshold	8	5,12	
No roaming threshold	50	32	-68
Force roaming threshold	12	7,68	-92,32
escenario 1			

Con estos valores el cliente comenzará a escanear antes, a partir de -68 dBm. En el test1 este valor estaba configurado a -71 dBm, al escanear antes se le da más tiempo al cliente a evaluar la situación y no llegar al *forced roaming*.

A continuación, se adjunta un pantallazo resumen con los resultados de la prueba:

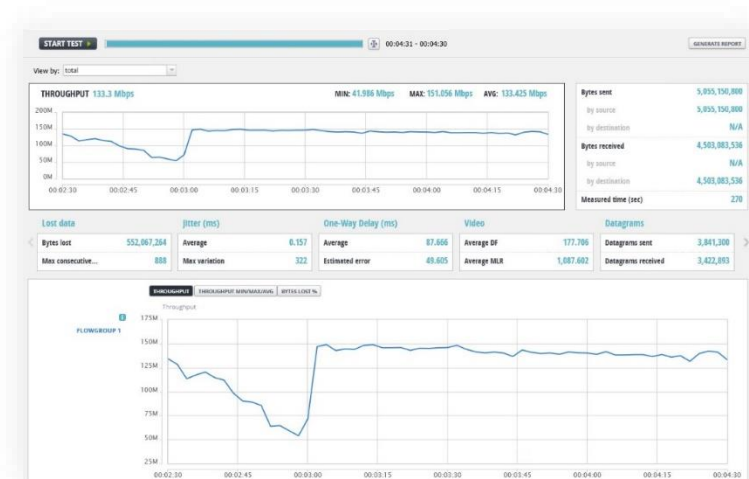


Figura 208 – Resumen throughput para test2

Como se puede observar en la Figura 208, en las pruebas de *roaming* del test2 se ha alcanzado:

- Un máximo de 151 Mb/s.
- Un mínimo de 41 Mb/s.
- Una media de 133 Mb/s.

Si se observa la gráfica del *throughput* de la prueba completa:

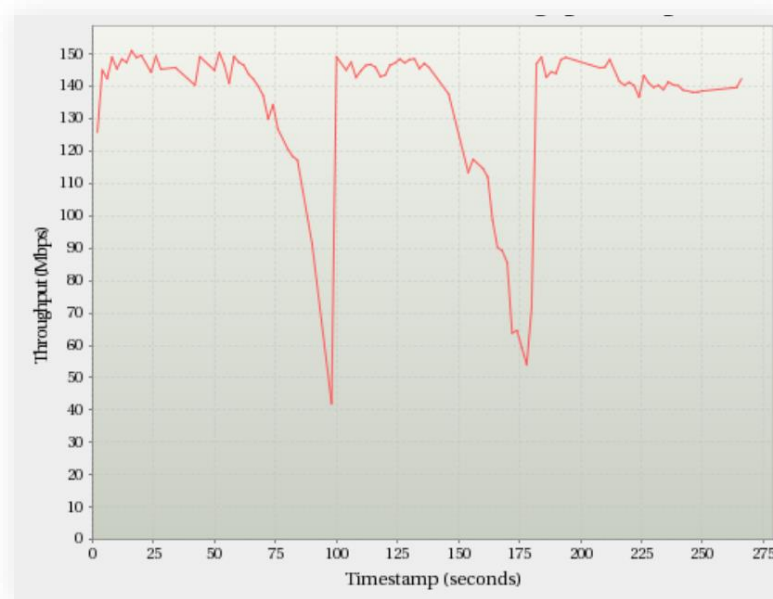


Figura 209 – Gráfica de throughput para test2

En la Figura 209 se puede observar los 2 *roamings* que ejecuta el cliente:

- AP1>AP2: la tasa de transferencia cae a casi 40 Mbps.
- AP2>AP3: la tasa de transferencia cae a casi 55 Mbps.

### 7.6.1.3. Test 3 – Roaming a 50% y Force a 41%

Para este test se ha utilizado el escenario de atenuación 1 (ver Figura 113) y los datos de configuración:

- *Roaming threshold: 8%*
- *No roaming threshold: 50%*
- *Force roaming threshold: 41%*

Estos valores se corresponden con los siguientes niveles de señal:

Tabla 58 – Equivalencia de % a dB/dBm en test3

	Test3 (%)	dB	Signal (dBm)
Roaming threshold	8	5,12	
No roaming threshold	50	32	-68
Force roaming threshold	41	26,24	-73,76
escenario 1			

En este test se fuerza el *roaming* alrededor de los -73dBm, en el test2 estaba configurado alrededor de -92dBm. Con esto se espera evitar la caída de señal a -73 dBm en el peor caso.

A continuación, se adjunta un pantallazo resumen con los resultados de la prueba:

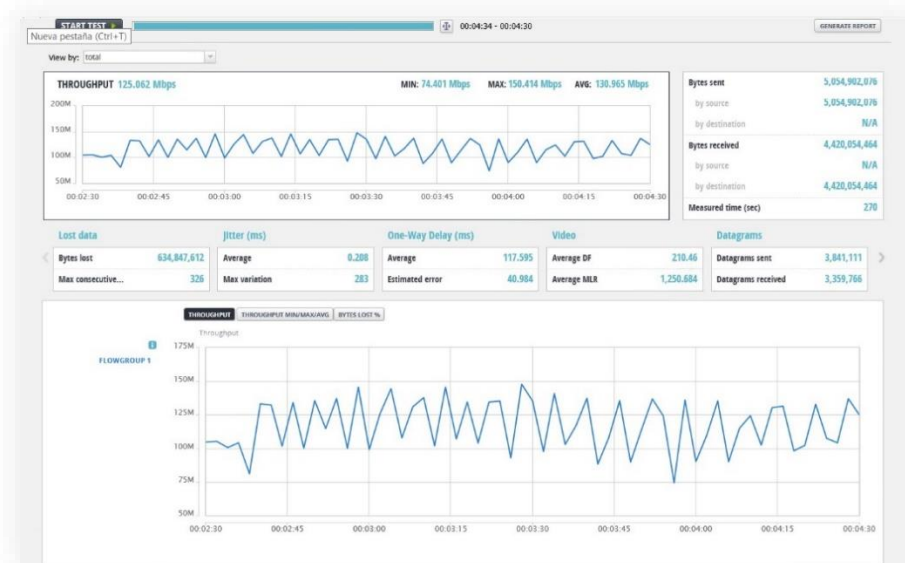


Figura 210 – Resumen throughput para test3

Como se puede observar en la Figura 210, en las pruebas de *roaming* del test3 se ha alcanzado:

- Un máximo de 150 Mbps.
- Un mínimo de 74 Mbps.
- Una media de 130 Mbps.

Si se observa la gráfica del *throughput* de la prueba completa:

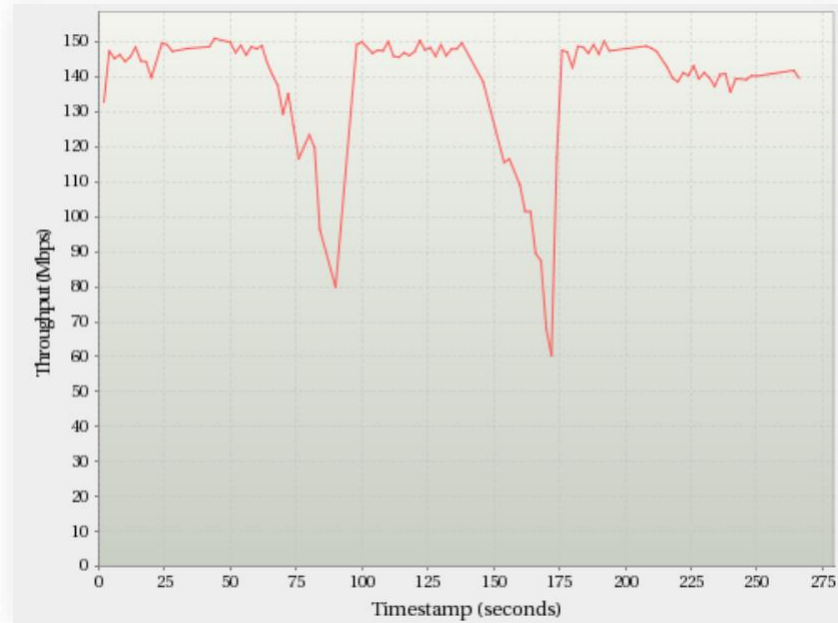


Figura 211 – Gráfica de *throughput* para *test3*

En la Figura 211 se puede observar los 2 *roamings* que ejecuta el cliente:

- AP1>AP2: la tasa de transferencia cae a casi 80 Mbps.
- AP2>AP3: la tasa de transferencia cae a casi 60-70 Mbps.

### 7.6.1.4. Test 4 – Roaming a 55% y Force a 45%

Para este test se ha utilizado el escenario de atenuación 1 (ver Figura 113) y los datos de configuración:

- *Roaming threshold: 8%*
- *No roaming threshold: 55%*
- *Force roaming threshold: 45%*

Estos valores se corresponden con los siguientes niveles de señal:

Tabla 59 – Equivalencia de % a dB/dBm en test4

	Test4 (%)	dB	Signal (dBm)
Roaming threshold	8	5,12	
No roaming threshold	55	35,2	-64,8
Force roaming threshold	45	28,8	-71,2
escenario 1			

En este test se han vuelto a subir ambos parámetros para intentar que el cliente ejecute el *roaming* antes de que la señal se reduzca mucho.

A continuación, se adjunta un pantallazo resumen con los resultados de la prueba:

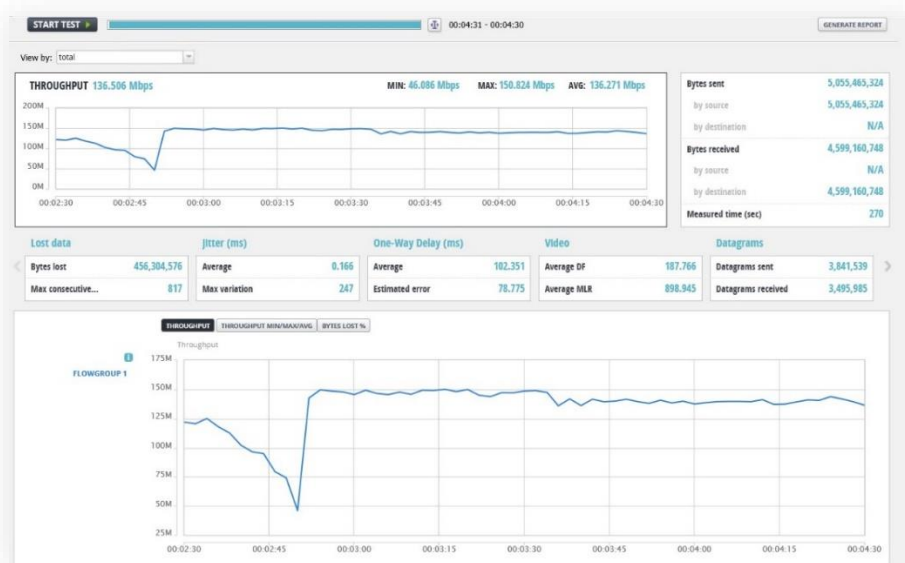


Figura 212 – Resumen throughput para test4

Como se puede observar en la Figura 212, en las pruebas de *roaming* del test4 se ha alcanzado:

- Un máximo de 150 Mbps.
- Un mínimo de 46 Mbps.
- Una media de 136 Mbps.

Si se observa la gráfica del *throughput* de la prueba completa:

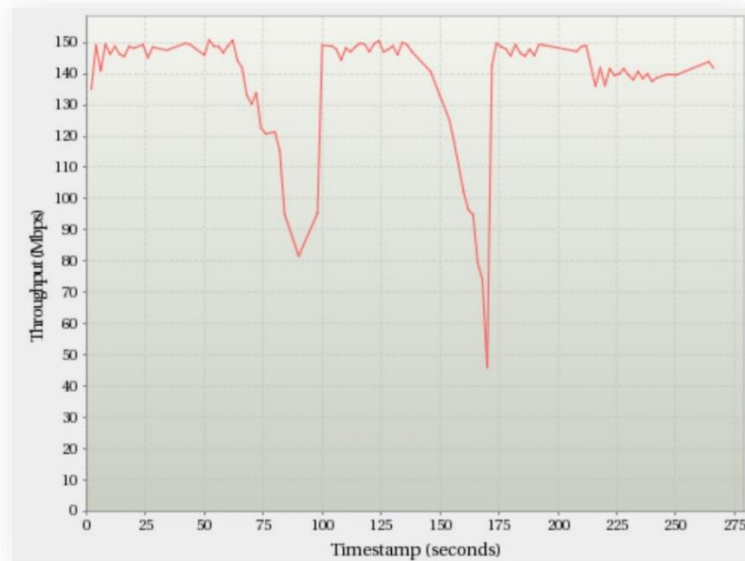


Figura 213 – Gráfica de *throughput* para test4

En la Figura 213 se puede observar los 2 *roamings* que ejecuta el cliente:

- AP1>AP2: la tasa de transferencia cae a casi 80-90 Mbps.
- AP2>AP3: la tasa de transferencia cae a casi 40-50 Mbps.

### 7.6.1.5. Test 5 – Roaming a 60% y Force a 51%

Para este test se ha utilizado el escenario de atenuación 1 (ver Figura 113) y los datos de configuración:

- *Roaming threshold: 8%*
- *No roaming threshold: 60%*
- *Force roaming threshold: 41%*

Estos valores se corresponden con los siguientes niveles de señal:

Tabla 60 – Equivalencia de % a dB/dBm en test5

	Test5 (%)	dB	Signal (dBm)
Roaming threshold	8	5,12	
No roaming threshold	60	38,4	-61,6
Force roaming threshold	51	32,64	-67,36
escenario 1			

En este test se han vuelto a subir ambos parámetros para intentar que el cliente ejecute el *roaming* antes de que la señal se reduzca mucho, la idea es ir subiendo los parámetros para caracterizar bien los equipos.

A continuación, se adjunta un pantallazo resumen con los resultados de la prueba:

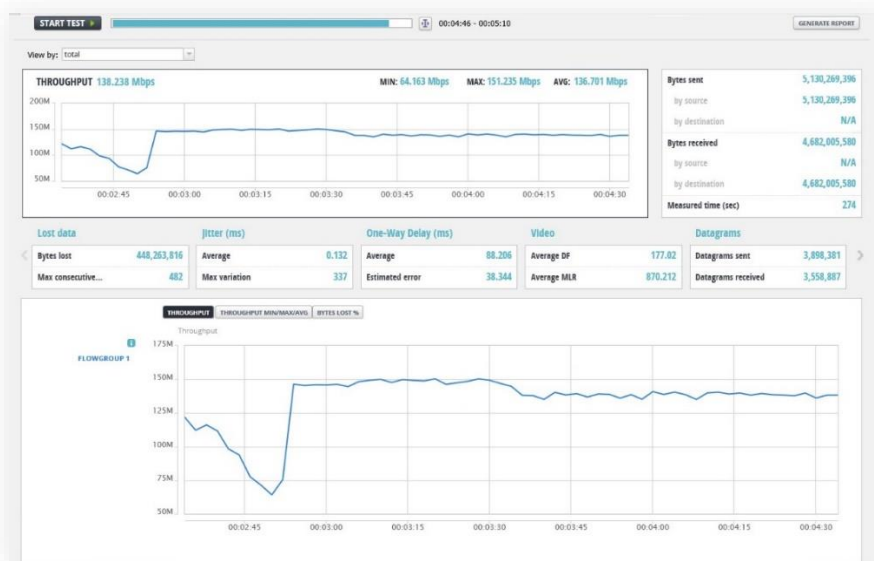


Figura 214 – Resumen throughput para test5

Como se puede observar en la Figura 214, en las pruebas de *roaming* del test5 se ha alcanzado:

- Un máximo de 151 Mbps.
- Un mínimo de 64 Mbps.
- Una media de 136 Mbps.



Si se observa la gráfica del *throughput* de la prueba completa:

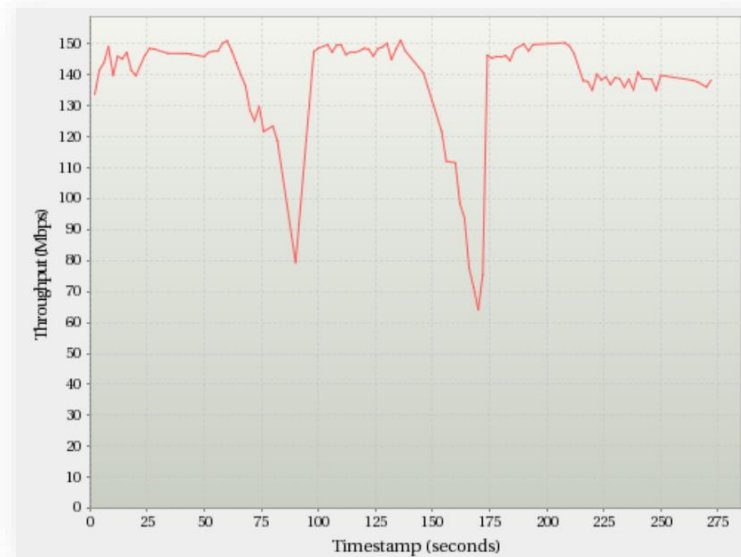


Figura 215 – Gráfica de *throughput* para *test5*

En la Figura 213 se puede observar los 2 *roamings* que ejecuta el cliente:

- AP1>AP2: la tasa de transferencia cae a casi 80-90 Mbps.
- AP2>AP3: la tasa de transferencia cae a casi 60-70 Mbps.

### 7.6.1.6. Test 6 – Roaming a 70% y Force a 61%

Para este test se ha utilizado el escenario de atenuación 1 (ver Figura 113) y los datos de configuración:

- *Roaming threshold: 8%*
- *No roaming threshold: 70%*
- *Force roaming threshold: 61%*

Estos valores se corresponden con los siguientes niveles de señal:

Tabla 61 – Equivalencia de % a dB/dBm en test6

	Test6 (%)	dB	Signal (dBm)
Roaming threshold	8		
No roaming threshold	70	44,8	-55,2
Force roaming threshold	61	39,04	-60,96
escenario 1			

Se siguen aumentando ambos parámetros para ver cómo afectan al *roaming* y al *throughput*.

A continuación, se adjunta un pantallazo resumen con los resultados de la prueba:

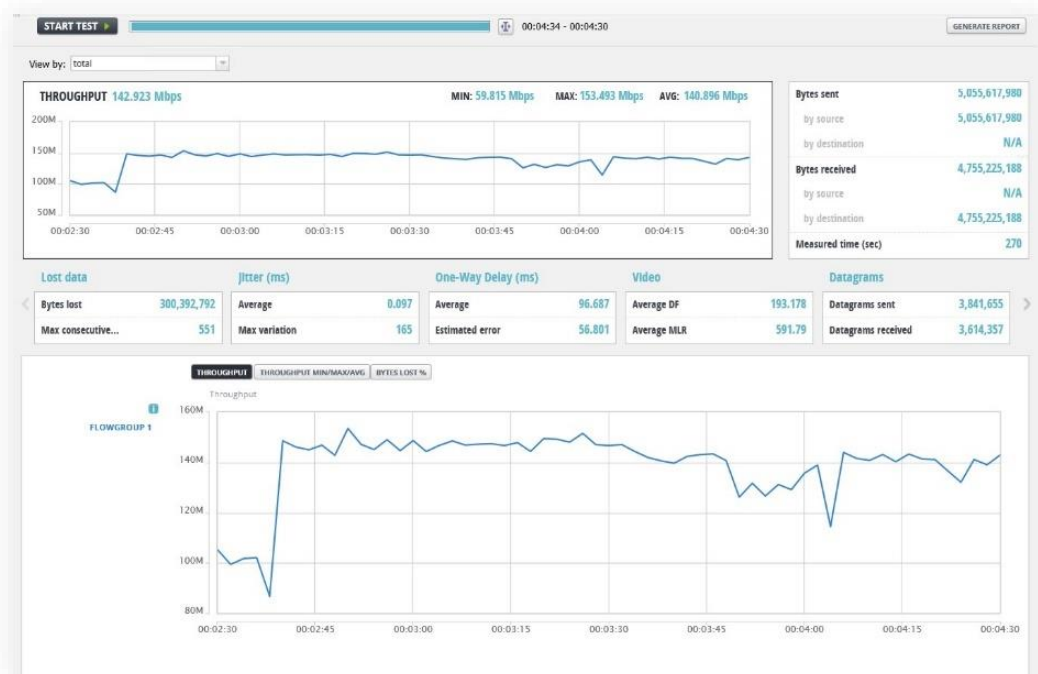


Figura 216 – Resumen throughput para test6

Como se puede observar en la Figura 216, en las pruebas de *roaming* del test6 se ha alcanzado:

- Un máximo de 153 Mbps.
- Un mínimo de 59 Mbps.
- Una media de 140 Mbps.

Si se observa la gráfica del *throughput* de la prueba completa:



Figura 217 – Gráfica de *throughput* para test6

En la Figura 217 se puede observar los 2 *roamings* que ejecuta el cliente:

- AP1>AP2: la tasa de transferencia cae a casi 60 Mbps.
- AP2>AP3: la tasa de transferencia cae a casi 100-110 Mbps.

En el AP3 se ven los efectos del *background scan* que influye en la tasa de transferencia, recuadro amarillo, está configurado a -55dBm y con una atenuación de 35dB el AP3 está alrededor de esa señal al final de su rampa.

### 7.6.1.7. Test 7 – Roaming a 78% y Force a 61%

Para este test se ha utilizado el escenario de atenuación 1 (ver Figura 113) y los datos de configuración:

- *Roaming threshold: 8%*
- *No roaming threshold: 78%*
- *Force roaming threshold: 61%*

Estos valores se corresponden con los siguientes niveles de señal:

Tabla 62 – Equivalencia de % a dB/dBm en test7

	Test7 (%)	dB	Signal (dBm)
Roaming threshold	8		
No roaming threshold	78	49,92	-50,08
Force roaming threshold	61	39,04	-60,96
escenario 1			

Se siguen aumentando el *no roaming threshold* para que comience con el escaneo antes.

A continuación, se adjunta un pantallazo resumen con los resultados de la prueba:

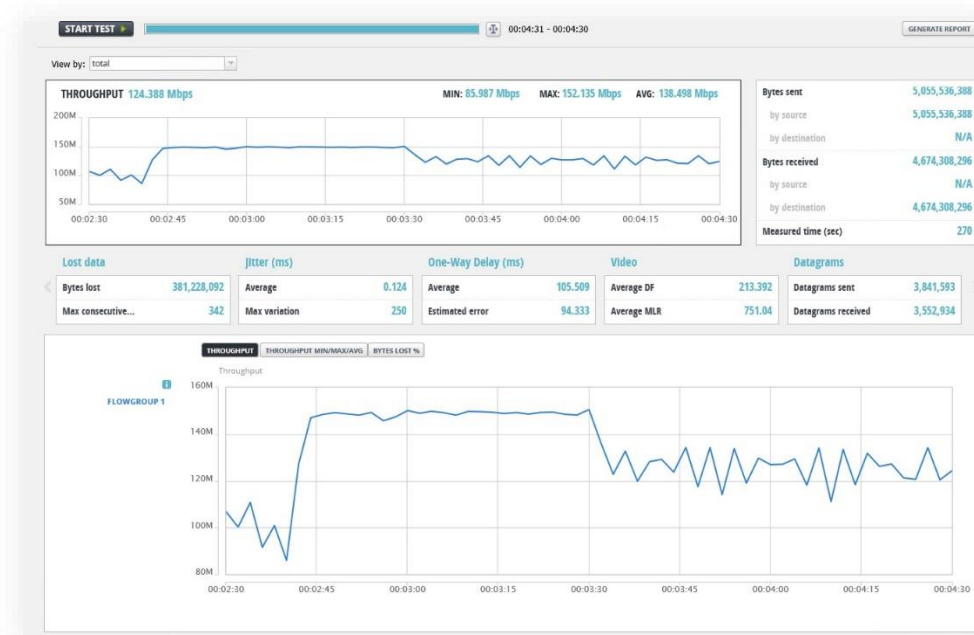


Figura 218 – Resumen throughput para test7

Como se puede observar en la Figura 218, en las pruebas de *roaming* del test7 se ha alcanzado:

- Un máximo de 152 Mbps.
- Un mínimo de 85 Mbps.
- Una media de 138 Mbps.

Si se observa la gráfica del *throughput* de la prueba completa:

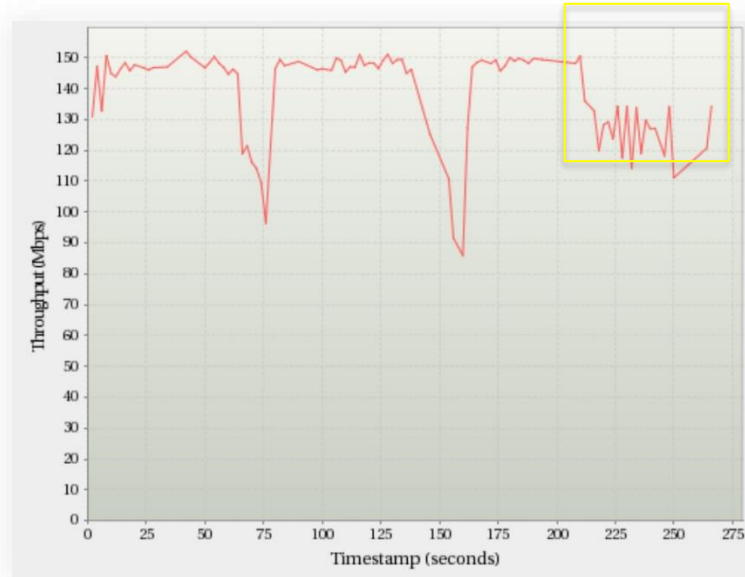


Figura 219 – Gráfica de *throughput* para test7

En la Figura 219 se puede observar los 2 *roamings* que ejecuta el cliente:

- AP1>AP2: la tasa de transferencia cae a casi 100-110 Mbps.
- AP2>AP3: la tasa de transferencia cae a casi 90-100 Mbps.
- AP3: el escaneo perjudica la tasa de transferencia, cuadro amarillo.

### 7.6.1.8. Test 8 – Roaming a 62% y Force a 42%

Para este test se ha utilizado el escenario de atenuación 1 (ver Figura 113) y los datos de configuración:

- *Roaming threshold: 7%*
- *No roaming threshold: 62%*
- *Force roaming threshold: 42%*

Estos valores se corresponden con los siguientes niveles de señal:

Tabla 63 – Equivalencia de % a dB/dBm en test8

	Test8 (%)	dB	Signal (dBm)
Roaming threshold	7	4,48	
No roaming threshold	62	39,68	-60,32
Force roaming threshold	42	26,88	-73,12
escenario 1			

Con los resultados de las pruebas anteriores, y la simulación de Ekahau, **se ha decidido esta solución como la preliminar que se aplicará en campo:**

- A -60dBm debe comenzar a escanear.
- A -73dBm debe ejecutar el roaming al siguiente AP que tenga escaneado.
- Se configura el *roaming threshold* a 7 para que solo necesite una señal un poco mejor para contemplarla como buena candidata.
- En la simulación con Ekahau, ver 3.1.2.1, la señal del AP1 alcanzaba la posición del AP2 con -65/-70dBm (a 350 metros de distancia). Así que con estos datos están definidos los valores antes descritos.

A continuación, se adjunta un pantallazo resumen con los resultados de la prueba:

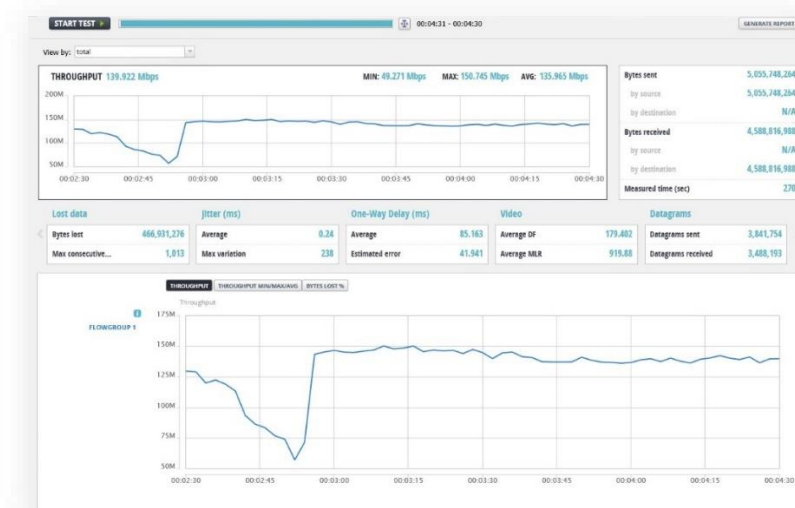


Figura 220 – Resumen throughput para test8

Como se puede observar en la Figura 220, en las pruebas de *roaming* del test8 se ha alcanzado:

- Un máximo de 150 Mbps.
- Un mínimo de 49 Mbps.
- Una media de 135 Mbps.

Si se observa la gráfica del *throughput* de la prueba completa:



Figura 221 – Gráfica de *throughput* para test8

En la Figura 221 se puede observar los 2 *roamings* que ejecuta el cliente:

- AP1>AP2: la tasa de transferencia cae a casi 70-80 Mbps.
- AP2>AP3: la tasa de transferencia cae a casi 60-70 Mbps.



### 7.6.1.9. Test 9 – Valores test 8 en escenario 2

Para este test se ha utilizado el escenario de atenuación 2, ver Figura 114, y la misma configuración que en el test 8 (ver apartado 7.6.1.8).

Lo importante de este test es que se unen los parámetros definidos para el test 8 con un escenario más real donde las señales de los APs están apantalladas: la señal del AP2 no es captada por el cliente hasta los 350 metros, tal y como se confirmó en la simulación con Ekahau (ver apartado 3.1.2).

Otro de los puntos a remarcar es que, el atenuador se configura a 2 segundos entre escalones. Esto provoca que la prueba se reduzca y se aproxime a la velocidad del tren. Dado que los atenuadores se inician a mano (canal por canal), no es factible configurarlo con un tiempo menor a 2 segundos.

Por lo tanto, la tabla de parámetros queda así:

Tabla 64 – Equivalencia de % a dB/dBm en test9

	Test9 (%)	dB	Signal (dBm)
Roaming threshold	7	4,48	
No roaming threshold	62	39,68	-60,32
Force roaming threshold	42	26,88	-73,12

escenario 2

A continuación, se adjunta un pantallazo resumen con los resultados de la prueba:

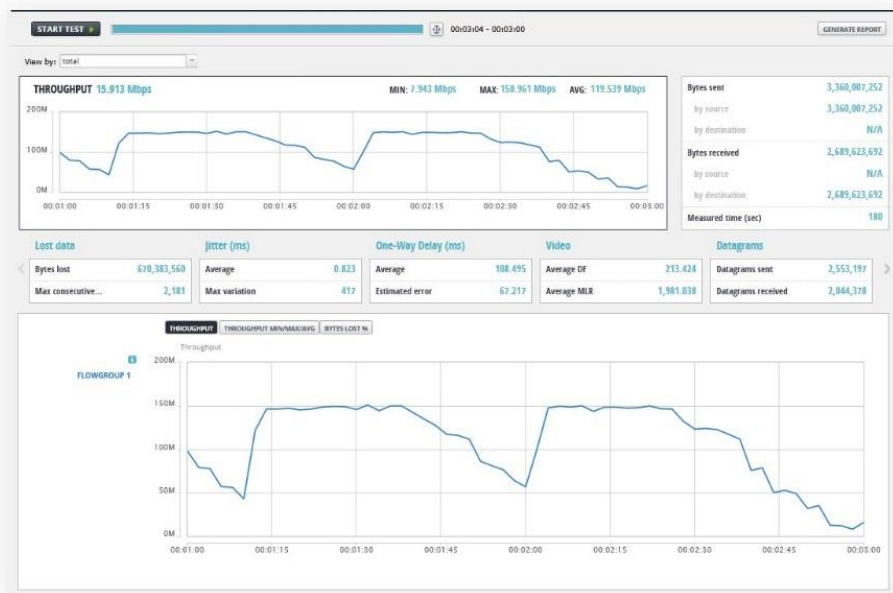


Figura 222 – Resumen throughput para test9

Como se puede observar en la Figura 222, en las pruebas de *roaming* del test9 se ha alcanzado:

- Un máximo de 150 Mbps.
- Esta vez el mínimo no es medible porque al no haber una AP después del AP3 la señal se ha atenuado al máximo y ha empezado a escanear sin encontrar otra opción.
- Una media de 119 Mbps, aunque esto se ha visto reducido por el AP3 y sus mínimos.

Si se observa la gráfica del *throughput* de la prueba completa:

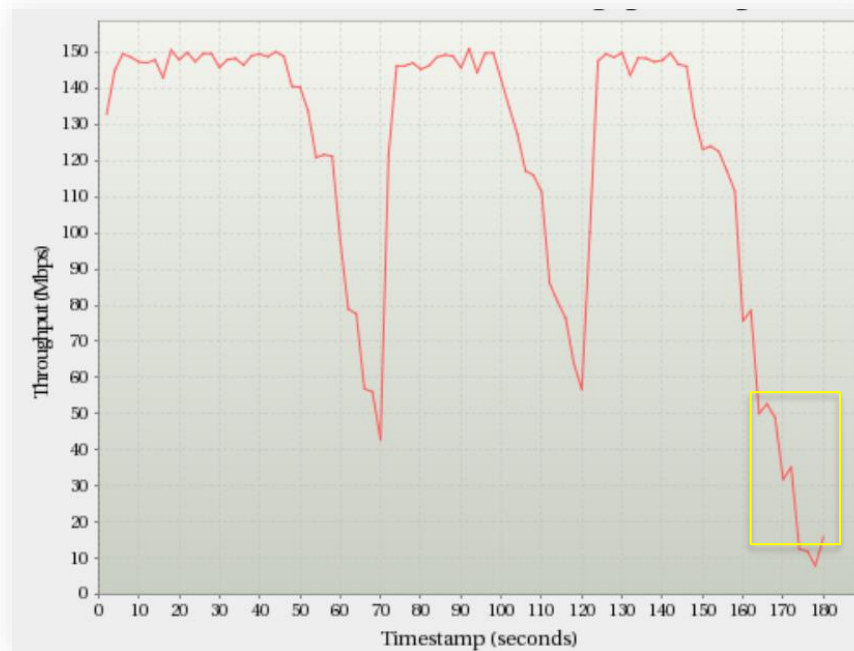


Figura 223 – Gráfica de *throughput* para test9

En la Figura 223 se puede observar los 2 *roamings* que ejecuta el cliente:

- AP1>AP2: la tasa de transferencia cae a casi 40-50 Mbps.
- AP2>AP3: la tasa de transferencia cae a casi 60-70 Mbps.
- AP3 hay que obviar toda la parte marcada en amarillo porque no existe un AP4 al que conectarse (con mejor señal).

## 7.7. Fuentes utilizadas para el estudio económico

Equipamiento centro de control:

- *HARDWARE*:
  - Huawei Atlas 800 (modelo 3000):  
<https://itprice.com/es/huawei-price-list/atlas%203000.html>
  - Streamvault:  
<https://ucnj.org/vendor-opportunities/wp-content/uploads/sites/9/2022/03/Genetec-Pricelist.xls>
  - Switch Huaewi (tierra):  
<https://www.router-switch.com/s5731-s24p4x.html>
  - Armario rack:  
[https://cablematic.com/es/productos/armario-rack-19-de-pie-29u-600x800x1400mm-mobirack-de-rackmatic-WL022/?gad\\_source=1&qclid=Cj0KCQiAy9msBhD0ARIsANbk0A-XLI\\_SuIExZ9fR6aSMeeHGPEtvvK25EIDDFrwChNoyDDfVnmlIhl0aAqKGEALw\\_wcB](https://cablematic.com/es/productos/armario-rack-19-de-pie-29u-600x800x1400mm-mobirack-de-rackmatic-WL022/?gad_source=1&qclid=Cj0KCQiAy9msBhD0ARIsANbk0A-XLI_SuIExZ9fR6aSMeeHGPEtvvK25EIDDFrwChNoyDDfVnmlIhl0aAqKGEALw_wcB)
- *SOFTWARE*:
  - Vsphere 8:  
[https://www.vmstore.es/product/vmware-vcenter-server-8-standard-for-vsphere-8-\(per-instance\)](https://www.vmstore.es/product/vmware-vcenter-server-8-standard-for-vsphere-8-(per-instance))
  - Security Center Suite:  
[https://osp.admin.mn.gov/sites/osp/files/2023-04/s-8135genetec\\_11.2.2022.xls](https://osp.admin.mn.gov/sites/osp/files/2023-04/s-8135genetec_11.2.2022.xls)
  - HiVision:  
<https://www.industrialnetworking.com/Manufacturers/Hirschmann-Network-Management-Software>
  - BAT-Controller Virtual:  
<https://www.industrialnetworking.com/Manufacturers/Hirschmann-BAT-Accessories/Hirschmann-BAT-Controller-Virtual-Software-Licenses>

Equipamiento de vía:

- Caja de vía:  
<https://es.rs-online.com/web/p/cajas-de-pared/7755814>

- Punto de acceso:  
<https://es.rs-online.com/web/p/puntos-de-acceso-inalambricos/2456854>
- Fuente de alimentación:  
<https://es.rs-online.com/web/p/fuentes-de-alimentacion-de-montaje-en-carril-din/6700649>
- Conversor de medios:  
<https://us.rs-online.com/product/hirschmann/spider-pl-40-01t1o69999ty9hhhh/70908004/>
- Antenas:  
<https://www.mouser.es/ProductDetail/HUBER%2bSUHNER/1356.17.0090?qs=Cv1v43EOJpot%252B9wztlINDQ%3D%3D>
- Descargador/Surge arrestor:  
<https://www.mouser.es/ProductDetail/HUBER+SUHNER/3400.17.0428?qs=Cv1v43EOJprFCr3Sc7NRTq%3D%3D>
- Cable RF *feeder*:  
[https://es.rs-online.com/web/p/cables-coaxiales/4262072?cm\\_mmc=ES-PLA-DS3A--google--CSS ES ES PMAX RS+PRO--4262072&matchtype=&&gad\\_source=1&qclid=Cj0KCQiAy9msBhD0ARIsANbk0A9xG0RyRuukZ5mR6HPYFusulki-QXX9a1vYQCQ8x3Nrlf69unxLkn3QaAnynEALw\\_wcB&qclsrc=aw.ds](https://es.rs-online.com/web/p/cables-coaxiales/4262072?cm_mmc=ES-PLA-DS3A--google--CSS ES ES PMAX RS+PRO--4262072&matchtype=&&gad_source=1&qclid=Cj0KCQiAy9msBhD0ARIsANbk0A9xG0RyRuukZ5mR6HPYFusulki-QXX9a1vYQCQ8x3Nrlf69unxLkn3QaAnynEALw_wcB&qclsrc=aw.ds)
- Cable RF *jumper*:  
[https://es.farnell.com/rf-solutions/cba-nm-nm1/cable-assy-n-type-male-male-1m/dp/3404268?gad\\_source=1&cjevent=9d99592cab2211ee813800680a18ba74&cjdata=MXxZfDB8WXww&CMP=AFC-CJ-ES-1765328&gross\\_price=true&source=CJ](https://es.farnell.com/rf-solutions/cba-nm-nm1/cable-assy-n-type-male-male-1m/dp/3404268?gad_source=1&cjevent=9d99592cab2211ee813800680a18ba74&cjdata=MXxZfDB8WXww&CMP=AFC-CJ-ES-1765328&gross_price=true&source=CJ)

#### Equipamiento por cabina de tren:

- Antenas (*shark*):  
<https://www.mouser.es/ProductDetail/HUBER%2bSUHNER/1356.17.0010?qs=Cv1v43EOJpra%2FDyyzqmlfA%3D%3D>
- Cliente/Módem embarcado (ver *link* del punto de acceso en vía).
- Cable RF *feeder* (ver *link* de vía).
- Cable RF *jumper* (ver *link* de vía).