

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIONES EN IOT

**SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES
UTILIZANDO LA TECNOLOGÍA IEEE 802.11AH**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
TELECOMUNICACIONES**

ERIC DANIEL CHINCHIN MORAN

eric.chinchin@epn.edu.ec

DIRECTORA: PHD. SORAYA LUCIA SINCHE MAITA

soraya.sinche@epn.edu.ec

Quito, febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, ERIC DANIEL CHINCHIN MORAN declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

ERIC DANIEL CHINCHIN MORAN

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por ERIC DANIEL CHINCHIN MORAN, bajo mi supervisión.

PHD. SORAYA LUCIA SINCHÉ MAITA
DIRECTORA

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

ERIC DANIEL CHINCHIN MORAN

PHD. SORAYA LUCIA SINCHE MAITA

DEDICATORIA

A las mujeres más importantes de mi vida, mi madre Alexandra Moran, mis hermanas Antonella Chinchin y Naydelin Chinchin, a mi tía Helenita Chinchin por siempre creer en mí.

A mi padre Marco Chinchin que desde el cielo guía mi camino.

AGRADECIMIENTO

Principalmente a Dios por darme las fuerzas de seguir a pesar de cualquier dificultad, a mis familiares y amigos por su apoyo incondicional.

A la Escuela Politécnica Nacional por darme la oportunidad de crecer y aprender.

A mi tutora Soraya Sinche por su gran apoyo y paciencia durante la ejecución del trabajo.

Gracias a todos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VIII
ABSTRACT.....	IX
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico.....	3
1.4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE IEEE 802.11AH.....	4
1.4.1.1 Antecedentes estándar IEEE 802.11	4
1.4.2 CASOS DE USO DE IEEE 802.11AH	5
1.4.2.1 Redes de sensores	5
1.4.2.2 Redes de backhaul para sensores o medidores.....	5
1.4.2.3 Wi-Fi de rango extendido para descarga de tráfico celular	6
1.4.2.4 Comunicación de máquina a máquina (M2M).....	6
1.4.2.5 Comunicación rural	6
1.4.3 ARQUITECTURA IEEE 802.11AH.....	7
1.4.3.1 CAPA FÍSICA (PHY)	7
1.4.3.1.1 Canales de IEEE 802.11ah.....	7
1.4.3.1.2 Modos de transmisión de IEEE 802.11ah.....	8
1.4.3.2 CAPA CONTROL DE ACCESO AL MEDIO (MAC)	9
1.4.3.2.1 Soporte de un gran número de estaciones asociadas	9
1.4.3.2.2 Ahorro de energía.....	10
1.4.3.2.3 Acceso al canal	11
1.4.3.2.4 Mejoras de rendimiento.....	12
2 METODOLOGÍA.....	14
2.1 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN IEEE 802.11AH.....	14
2.1.1 PRIMER ESCENARIO	14

2.1.2	SEGUNDO ESCENARIO.....	16
2.1.3	TERCER ESCENARIO.....	17
2.2	CONSIDERACIONES EN ESCENARIOS IEEE 802.11AH	18
2.1.1	MODELO PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN PARA IEEE 802.11AH	18
2.1.1.1	Modelo para ambiente interior (indoor).....	18
2.1.1.2	Modelo para ambiente exterior (outdoor)	19
2.1.2	RENDIMIENTO IEEE 802.11AH.....	19
2.1.3	PÉRDIDAS DE PAQUETES IEEE 802.11AH	20
2.3	MÓDULO IEEE 802.11AH EN EL SIMULADOR NS-3.....	20
2.3.1	COMPONENTES DEL MÓDULO IEEE 802.11AH	21
2.3.1.1	Canal Físico Inalámbrico (Wi-Fi)	22
2.3.1.2	Capa Wi-Fi Física (Phy).....	22
2.3.1.3	Capa Baja de MAC.....	23
2.3.1.4	Capa Alta de MAC	24
2.3.2	CARACTERÍSTICAS DE LA CAPA FÍSICA	24
2.3.3	CARACTERÍSTICAS DE LA CAPA DE ACCESO AL MEDIO (MAC)	25
2.3.4	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE IEEE 802.11AH EN NS-3.....	25
2.3.4.1	Interfaz de configuración RAW.....	26
2.3.4.2	Modelo de consumo de energía	26
2.3.4.3	Segmentación TIM.....	28
2.4	IMPLEMENTACIÓN DE IEEE 802.11AH EN NS-3	29
2.4.1	CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS PARA ESCENARIOS.....	30
2.4.1.1	Parámetros relacionados con RAW	32
2.4.1.2	Parámetros del modo Wi-Fi	34
2.4.1.3	Parámetros de segmento de página y TIM	35
2.4.1.4	Otros parámetros importantes en la simulación	36
2.4.2	SIMULACIÓN DE ESCENARIOS	36
2.4.2.1	Diagramas de distribución.....	37
2.4.2.1	Ejecución de escenarios	38
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	41
3.1	RESULTADOS	41
3.1.1	ANÁLISIS ESCENARIO 1	41
3.1.2	ANÁLISIS ESCENARIO 2.....	46

3.1.3	ANÁLISIS ESCENARIO 3	50
3.2	CONCLUSIONES	55
3.3	RECOMENDACIONES	56
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
5	ANEXOS.....	59
	ANEXO I. INSTALACIÓN DEL MÓDULO IEEE 802.11AH EN NS-3.....	60
	ANEXO II. FORMATO DE LA CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS RAW ..	61
	ANEXO III. ENLACE PARA CÓDIGOS DE SIMULACIÓN	61

RESUMEN

El avance de las telecomunicaciones y el soporte a la gran cantidad de dispositivos conectados a través del Internet en los denominados Sistemas IoT, ha motivado a la aparición de nuevas tecnologías inalámbricas como IEEE 802.11ah siendo el principal objetivo del presente trabajo, analizar su comportamiento a frecuencias menores a 1 GHz, mediante la modificación de parámetros principales, que ayudan a establecer la cantidad de dispositivos que se pueden conectar a un solo punto de acceso, la distancia de cobertura adecuada para que los dispositivos logren asociarse, como también la cantidad de información que se puede transmitir.

Para este análisis se han definido diferentes escenarios y con la ayuda del NS-3 (*Network Simulator-3*), se han obtenido medidas de rendimiento y porcentajes de paquetes perdidos bajo determinadas condiciones.

El trabajo está estructurado en 3 capítulos. El primer capítulo incluye una fase teórica, donde se presenta un estudio de la estructura, funcionamiento y los nuevos mecanismos implementados en la capa física y de control de acceso al medio de la tecnología IEEE 802.11ah. En el segundo capítulo se presenta la fase de implementación y simulación con NS-3 de escenarios IEEE 802.11ah, utilizando repositorios digitales que se adapta a los diversos escenarios planteados. Finalmente, en el capítulo 3, se realiza una fase de análisis de los datos obtenidos en las simulaciones realizadas, que permite conocer el comportamiento de esta tecnología definida para sistemas IoT.

PALABRAS CLAVE: IEEE 802.11ah, HaLow, Internet de las cosas, IoT, Tecnología inalámbrica

ABSTRACT

The advance of telecommunications and support for the large number of devices connected through the Internet in the so-called IoT systems, has led to the emergence of new wireless technologies such as IEEE 802.11ah being the main goal of this work, which analyzes the behavior of IEEE 802.11ah technology which operates at frequencies below 1 GHz, by modifying the main parameters, which help to establish the number of devices that can be connected to a single access point, the proper coverage for devices to associate, as well as the amount of information that can be transmitted.

For this analysis, different scenarios have been defined and with the help of NS-3 (Network Simulator-3), performance measurements and percentages of packets lost under certain conditions have been obtained.

The work is structured in three chapters. The first chapter includes a theoretical phase, where a study of the structure, operation and new mechanisms implemented in the physical layer and media access control layer of IEEE 802.11ah technology is presented. The second chapter presents the implementation and simulation phase with NS-3 of IEEE 802.11ah scenarios, using digital repositories that adapt to the various scenarios proposed. Finally, in chapter 3, an analysis phase of the data obtained in the simulations is carried out, which allows to know the behavior of this technology defined for IoT systems.

KEYWORDS: IEEE 802.11ah, HaLow, Internet of Things, IoT, Wireless technology.

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, tener dispositivos conectados a Internet se ha convertido en una necesidad, por lo cual es importante conocer las nuevas tecnologías y estándares inalámbricos que soportan estas conexiones, con el fin de analizar y determinar los desafíos de estas tecnologías para Sistemas IoT (*Internet of Things*).

El estándar IEEE 802.11ah también conocido como Wi-Fi HaLow, es una de estas nuevas tecnologías, que opera en una banda de frecuencia sin licencia por debajo de 1 GHz. Fue diseñado para proporcionar comunicaciones en un rango de hasta 1 kilómetro a una velocidad de 150 Kbps y permite la conexión con una mayor cantidad de dispositivos, convirtiéndose en una tecnología ideal para dar soporte a los Sistemas IoT (*Internet of Things*) [1] [2].

IEEE 802.11ah centra sus mejoras en modificaciones tanto de la capa física para lograr operar en bandas de frecuencia menores a 1 GHz como también en la capa de control de acceso al medio (MAC) en la cual se implementan nuevos mecanismos para cumplir con las exigencias de la gran cantidad de dispositivos conectados en sistemas IoT, como son el ahorro de consumo de energía mediante el uso de mapas de indicación de tráfico (TIM), acceso al canal con mayor eficiencia implementado una función de ventana de acceso restringido (RAW) que permite dividir la gran cantidad de estaciones conectadas en diferentes grupos lo cual ayuda a evitar las colisiones y finalmente utiliza formatos de tramas más compactas para mejoras de rendimiento [3].

La tecnología IEEE 802.11ah cuenta con propiedades que se caracterizan por ofrecer diferentes servicios y aplicaciones con ancho de banda bajo a un largo alcance, a bajo costo y a baja potencia [4], lo que produce un gran interés en diversas aplicaciones de sistemas IoT, principalmente por las redes de sensores utilizadas para monitoreo y control, en la cual la cantidad de dispositivos conectados serán mayores a los que soportan las tecnologías inalámbricas existentes.

El estudio de la tecnología IEEE 802.11ah permitirá comprender sus componentes, ventajas y desventajas de su implementación, así como las áreas en las cuales puede ser utilizada como también la compatibilidad otras tecnologías existentes [1] [5].

Implementar y simular escenarios IEEE 802.11ah, con la ayuda de paquetes como el simulador de red NS-3, permite entender el comportamiento y funcionamiento de la tecnología en diferentes escenarios que pueden ser utilizados en algunos los campos de aplicación de Sistemas IoT (*Internet of Things*).

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la tecnología IEEE 802.11ah en base a escenarios de simulación utilizando NS-3.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar los conceptos de la tecnología IEEE 802.11ah.
- Revisar la arquitectura y los componentes de la tecnología IEEE 802.11ah.
- Implementar tres escenarios para la simulación de IEEE 802.11ah.
- Analizar los resultados obtenidos en las simulaciones.

1.3 ALCANCE

El presente trabajo busca analizar el funcionamiento del estándar IEEE802.11ah y observar si satisface los requerimientos para aplicaciones de sistemas IoT (*Internet of Things*).

Se inicia con una fase teórica, donde se presentan los conceptos básicos de la tecnología IEEE 802.11ah, así como sus principales características.

Seguido de una fase de análisis, que contendrá un estudio de todos los componentes de la tecnología orientada a ser utilizada en escenarios IoT (*Internet of Things*), como también en esta fase se presentará su arquitectura.

A continuación, se desarrollará una fase de implementación de escenarios de simulación con NS-3. Para la simulación se definirán tres tipos diferentes de escenarios de red, que pueden ser analizados tanto en ambientes interior(indoor) como exterior(outdoor), en los cuales se modifican parámetros, tales como la carga de tráfico, el número de estaciones, la distancia entre las estaciones al punto de acceso (AP), entre otros. Logrando observar el comportamiento de sus componentes.

Finalmente se realizará una fase de análisis de resultados obtenidos en las simulaciones, para posteriormente generar las respectivas conclusiones y recomendaciones.

1.4 MARCO TEÓRICO

El término Internet de las cosas “IoT” representa una conexión global de dispositivos informáticos integrados, en la cual pueden intercambiar datos entre sí y realizar controles utilizando Internet en cualquier lugar y en cualquier momento. IoT brinda un gran avance en el campo de la interconectividad de redes [4].

La popularidad de IoT ha aumentado en los últimos años; según *IoT Analytic* [6], se espera que para el 2025 existan 41,3 Billones de dispositivos conectados, como se observa en la Figura 1.1, de los cuales 30,9 Billones serán dispositivos IoT.

Un sistema IoT se caracteriza por ofrecer diferentes servicios y aplicaciones que requieren ser soportados por sistemas de comunicación de ancho de banda bajo a un largo alcance, a bajo costo y a baja potencia [4].

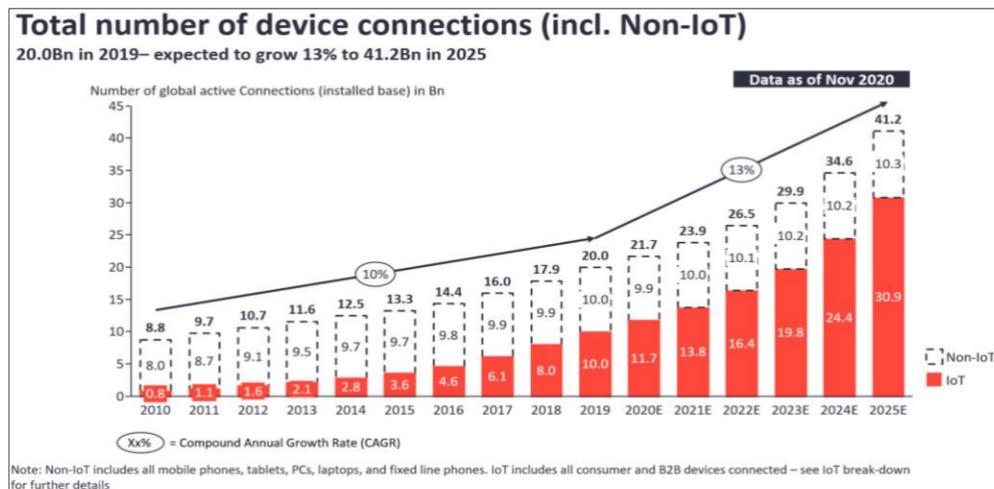


Figura 1.1 Cantidad de dispositivos IoT y Non-IoT conectados [6].

En este contexto, la IEEE publicó el estándar IEEE 802.11ah como tecnología de comunicaciones para sistemas IoT [7].

1.4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE IEEE 802.11AH

IEEE 802.11ah tiene como objetivo proporcionar conectividad WLAN con potencia ultra baja a diferentes números de estaciones que pueden ser fijas, portátiles y móviles [8].

El grupo de trabajo ah (TGah) es el responsable del desarrollo de este estándar que permite a las WLANs aprovechar entornos abiertos Sub-1 GHz. IEEE 802.11ah presenta un bajo consumo de energía, que permite la creación de grandes grupos de estaciones para compartir señales, apoyando el concepto de IoT [9].

1.4.1.1 Antecedentes estándar IEEE 802.11

El estándar IEEE 802.11 define las características de una red de área local inalámbrica (WLAN), que brindan conectividad y acceso a diferentes dispositivos inalámbricos.

WLAN no pretenden sustituir a las redes tradicionales cableadas, sino ser un complemento para ellas [10].

A lo largo del tiempo, la evolución de las comunicaciones inalámbricas es notable, algunas de estas variaciones IEEE 802.11 se encuentran en la Tabla 1.1, entre los cuales se puede observar que en cada nueva tecnología existe un aumento en la tasa de transmisión de datos, limitando el rango de transmisión, siendo este el principal objetivo del estudio de IEEE 802.11ah.

Tabla 1.1 Características de los estándares IEEE 802.11 comunes [10].

Standard	Frequency Band	Bandwidth	Modulation Scheme	Channel Arch.	Maximum Data Rate	Range	Max Transmit Power
802.11	2.4 GHz	20 MHz	BPSK to 256-QAM	DSSS, FHSS	2 Mbps	20 m	100 mW
b	2.4 GHz	21 MHz	BPSK to 256-QAM	CCK, DSSS	11 Mbps	35 m	100 mW
a	5 GHz	22 MHz	BPSK to 256-QAM	OFDM	54 Mbps	35 m	100 mW
g	2.4 GHz	23 MHz	BPSK to 256-QAM	DSSS, OFDM	54 Mbps	70 m	100 mW
n	2.4 GHz, 5 GHz	24 MHz and 40 MHz	BPSK to 256-QAM	OFDM	600 Mbps	70 m	100 mW
ac	5 GHz	20, 40, 80, 80+80=160 MHz	BPSK to 256-QAM	OFDM	6.93 Gbps	35 m	160 mW
ad	60 GHz	2.16 GHz	BPSK to 64-QAM	SC, OFDM	6.76 Gbps	10 m	10 mW
af	54-790 MHz	6, 7, and 8 MHz	BPSK to 256-QAM	SC, OFDM	26.7 Mbps	>1km ?	100 mW
ah	900 MHz	1, 2, 4, 8, and 16 MHz	BPSK to 256-QAM	SC, OFDM	40 Mbps	1 km	100 mW

1.4.2 CASOS DE USO DE IEEE 802.11AH

La tecnología IEEE 802.11ah presenta algunas características importantes para varios propósitos de aplicación discutidos por el grupo de trabajo TGah [11], en el que se observa casos de uso general que incluyen redes de sensores, redes de *backhaul* utilizados para mediciones, y uso de Wi-Fi de rango extendido [12]. También se puede considerar otros casos adicionales como la comunicación de máquina a máquina (M2M) y la comunicación rural [5]. Estos casos son descritos brevemente a continuación.

1.4.2.1 Redes de sensores

Una red de sensores se basa en dispositivos conectados a la red, donde las transmisiones son de corta duración y que pueden ser aplicadas a la industria, como un medidor inteligente de consumo de servicios de gas, agua y energía. IEEE 802.11ah puede ser utilizada como soporte de comunicaciones en redes de sensores, debido a que existe una mayor penetración a obstáculos y conexión de un gran número de sensores.

La Figura 1.2 muestra un escenario de red inteligente, que utiliza IEEE 802.11ah en las estaciones de medición inalámbricas cuando se aplica en ambientes interior (Indoor), mientras que para ambientes exteriores (Outdoor) se utilizan los dispositivos de automatización, todos asociados a un solo AP [5].

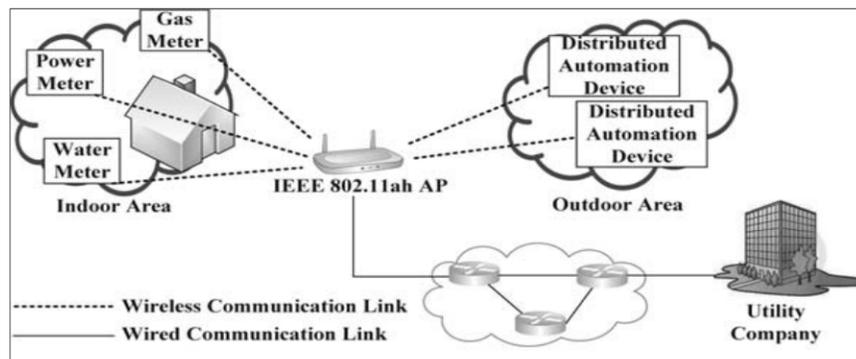


Figura 1.2 Red Inteligente IEEE 802.11ah [12].

1.4.2.2 Redes de backhaul para sensores o medidores

El segundo caso es una conexión de backhaul entre sensores o recolectores de datos y servidores remotos. La Figura 1.3 muestra una red de backhaul inalámbrica con un AP IEEE 802.11ah asociado a enrutadores como puertas de enlace, que agregan y reenvían el tráfico desde los dispositivos sensores a sistemas de control y la base de datos [5] [12].

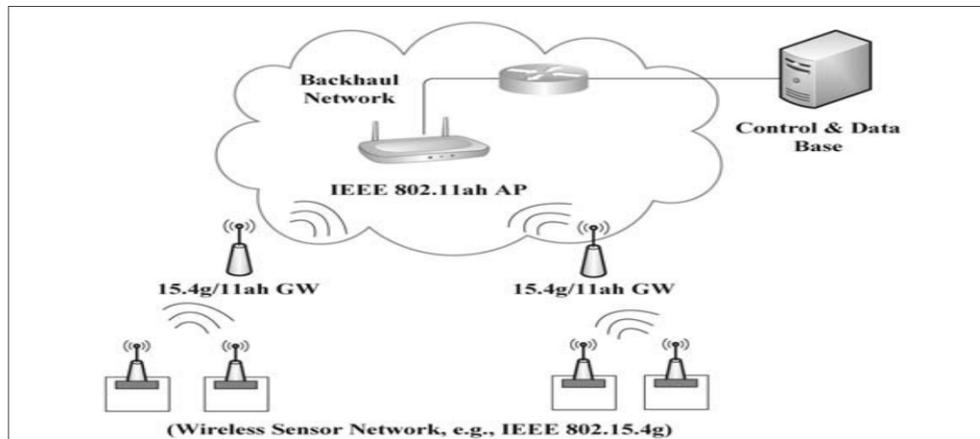


Figura 1.3 Red de *backhaul* para sensores y medidores [12].

1.4.2.3 Wi-Fi de rango extendido para descarga de tráfico celular

En este caso se considera que se cumplen con los requisitos para la descarga de tráfico celular con Wi-Fi utilizando IEEE 802.11ah. Conociendo que la tecnología tiene un rendimiento comparable al de los sistemas celulares para anchos de bandas altos tanto en la parte de usuarios como en la del operador [5].

1.4.2.4 Comunicación de máquina a máquina (M2M)

La comunicación máquina a máquina (M2M) permite intercambio de datos directos entre máquinas con mínima presencia del humano, la tecnología IEEE 802.11ah se considera como candidato a ser el sistema de comunicación inalámbrica utilizada en esta aplicación. El estudio y análisis de este caso de uso se detallan en [2], [3]. IEEE 802.11ah en este caso de uso incluye medición inteligente, monitoreo de seguridad y aplicaciones de carga empresarial bajo demanda [5].

1.4.2.5 Comunicación rural

La comunicación inalámbrica en las zonas rurales usa el término de conectar a los desconectados, donde IEEE 802.11ah al trabajar en la banda Sub-1 GHz permite obtener un rango de cobertura más amplio, ofreciendo un gran potencial de rendimiento para estos entornos.

Los principales aplicativos en estos casos estarían en el área relacionada con la salud, monitoreo agrícola y el aprendizaje en línea [5].

1.4.3 ARQUITECTURA IEEE 802.11AH

Como candidato de una tecnología para IoT y una solución WLAN para bandas Sub-1 GHz, el estándar 802.11ah como los otros estándares 802.11 define dos capas, la capa física (PHY) y la capa de control de acceso al medio (MAC), las cuales se describen a continuación [13].

1.4.3.1 CAPA FÍSICA (PHY)

La capa física definida en IEEE 802.11ah utiliza como base el estándar 802.11ac, haciendo uso de las técnicas de multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) y MIMO (múltiple entrada múltiple salida), adaptada a las bandas de frecuencias correspondientes.

1.4.3.1.1 Canales de IEEE 802.11ah

Los canales utilizados por la tecnología IEEE 802.11ah son de 1, 2, 4, 8 y 16 MHz, donde el canal básico es de 1 MHz [14]. La banda Sub 1GHz se enfrentó a la dificultad de regulación y anchos de bandas diferentes según la ubicación geográfica [15]. IEEE 802.11ah opera en la banda exenta de licencia por debajo de 1 GHz y no incluye las bandas de espacio en blanco para TV.

El espectro que utiliza se puede observar en la Figura 1.4, donde la banda de 863-868 MHz se define para Europa, 916.5 -927.5 MHz para Japón, 755-787 MHz para China, 917.5- 923.5 MHz para Corea, 866-869 MHz y 920-925 MHz para Singapur y 902-928 MHz para EE. UU.

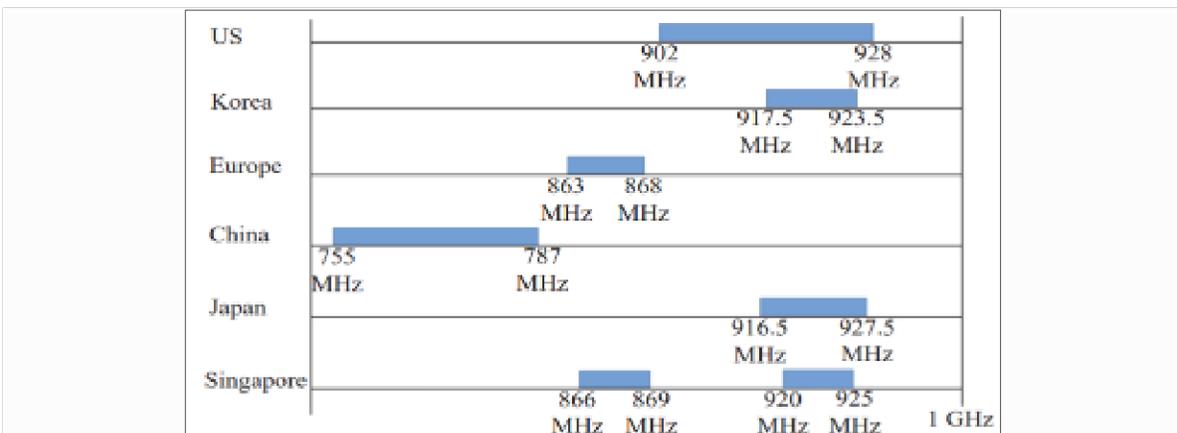


Figura 1.4 Espectro especificado para canales IEEE 802.11ah [12].

La Figura 1.5, muestra la canalización para los Estados Unidos, en la que se puede observar que existen 26 canales de 1 MHz, 13 canales de 2 MHz, 6 canales de 4 MHz, 3 canales de 8 MHz y un canal de 16 MHz [11].

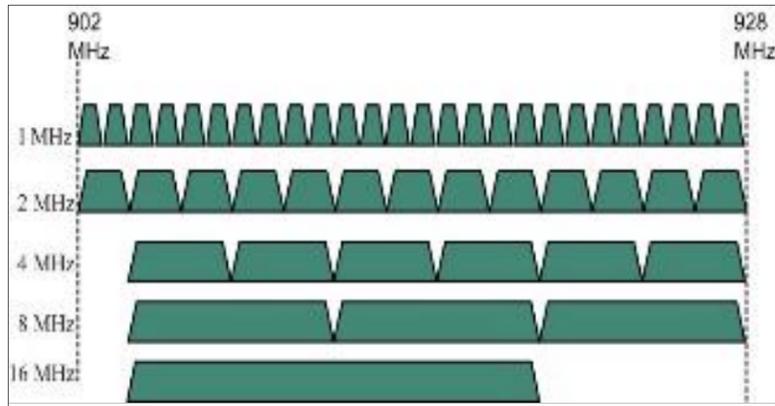


Figura 1.5 Canalización IEEE 802.11ah para Estados Unidos [11].

IEEE 802.11ah utiliza enlaces de canales al igual que 802.11n y 802.11ac, en la que varios canales se unen a canales adyacentes más estrechos permitiendo obtener canales con un ancho de banda de hasta de 16 MHz [12].

1.4.3.1.2 Modos de transmisión de IEEE 802.11ah

El diseño de la capa física para IEEE 802.11ah se clasifica dependiendo los modos de transmisión para los diferentes anchos de banda [12].

Para los modos de transmisión mayores o iguales a 2 MHz, la capa física se diseña reduciendo la capa física de 802.11ac siendo la duración de un símbolo OFDM 10 veces mayor.

Mientras que para el modo de transmisión de 1MHz de ancho de banda se ha utilizado un nuevo índice MCS, el MSC_10 que es el esquema de modulación y codificación que permitirá extender el rango de cobertura, facilitando la conexión de dispositivos IoT que requieren tasas de transmisiones bajas. [14].

El grupo de trabajo TGah define algunas velocidades de transmisión estándar en Mbps para una variedad de anchos de banda y MCS (Esquemas de Modulación y Codificación), que se muestra en la Tabla 1.2, en la cual se puede observar que dicha velocidad mejora, minimizando el período del símbolo OFDM.

Tabla 1.2. Velocidades de datos en Mbps de IEEE 802.11ah [12].

Índice MCS	Flujos espaciales	Tipo de modulación	Tasa de codificación	Velocidad [Mbps] Canales de 1MHz		Velocidad [Mbps] Canales de 2MHz	
				8 useg GI	4 useg GI	8 useg GI	4 useg GI
0	1	BPSK	1/2	0.3	0.33	0.65	0.72
1	1	QPSK	1/2	0.6	0.67	1.3	1.44
2	1	QPSK	3/4	0.9	1.0	1.95	2.17
3	1	16-QAM	1/2	1.2	1.33	2.6	2.09
4	1	16-QAM	3/4	1.8	2.0	3.9	4.33
5	1	64-QAM	2/3	2.4	2.67	5.2	5.78
6	1	64-QAM	3/4	2.7	3.0	5.85	6.5
7	1	64-QAM	5/6	3.0	3.34	6.5	7.22
8	1	256-QAM	3/4	3.6	4.0	7.8	8.67
9	1	256-QAM	5/6	4.0	4.44	N/A	N/A
10	1	BPSK	1/2*2	0.15	0.17	N/A	N/A

1.4.3.2 CAPA CONTROL DE ACCESO AL MEDIO (MAC)

En la capa MAC de IEEE 802.11ah se centra la mayor parte de mejoras de esta tecnología para cumplir con los requerimientos de sistemas IoT. Estas mejoras se orientan al soporte de un gran número de estaciones, incluyendo funciones que permiten el ahorro de consumo de energía, algunos mecanismos que permite acceder al canal con mayor eficiencia y formatos de tramas más compactas para mejoras de rendimiento [13]. El grupo de trabajo TGah analiza algunas mejoras de la capa MAC, las mismas que se encuentra descritas por Sun, Munhwan y Sunghyun [12], A continuación, se presenta una descripción breve de estas mejoras.

1.4.3.2.1 Soporte de un gran número de estaciones asociadas

En el sistema 802.11 ordinario, un AP asigna a cada estación un único identificador de asociación (AID) mientras se produce la etapa de asociación, el cual permite reconocer e indicar sus estaciones asociadas, el número de posibles estaciones asociadas a este AP es de hasta 2.007.

En IEEE 802.11ah se define una estructura de AID jerárquica como se muestra en la Figura 1.6, que permite aumentar el número de estaciones asociadas, el cual consta de 13 bits que permite hasta $2^{13} - 1 = 8191$ estaciones. La estructura jerárquica está compuesta por cuatro niveles que son: ID de página, índice de bloque, índice de sub-

bloque, e índice de la estación para cada sub-bloque, entonces el número máximo de estaciones que puede tener cada bloque es de 2048, esto permite agrupar estaciones que comparten características similares, como por ejemplo, mismo tipo de tráfico, ubicación o nivel de batería, mejorando así el ahorro de energía, asignación de recursos y acceso eficiente a los canales [12].

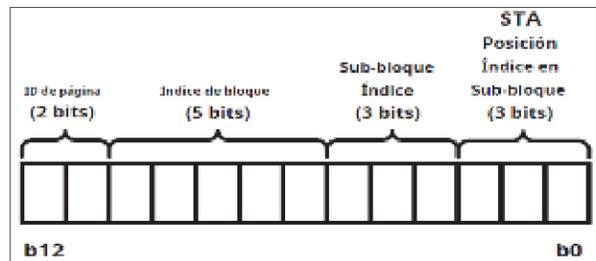


Figura 1.6 Estructura de AID IEEE 802.11ah [12]

1.4.3.2.2 Ahorro de energía

IEEE 802.11ah como parte del mecanismo de ahorro de energía utiliza las tablas TIM (Mapa de Indicación de Tráfico), que indican que existe una trama destinada a una estación, que arribó al AP cuando la estación estaba dormida. También utiliza segmentación de páginas, cuyo funcionamiento se muestra en la Figura 1.7.

En este ejemplo, cada beacon transporta secuencialmente el segmento de página, y cada intervalo de beacon se usa para acomodar la entrega de tráfico del segmento de página correspondiente. El funcionamiento de TIM y segmentación de página se basa en dividir todo el mapa de bits virtuales, por intermedio del punto de acceso, en segmentos de páginas más pequeños, cada estación se activa a tiempo para recibir su trama beacon que contiene el estado de almacenamiento en búfer en el mapa de indicación de tráfico de entrega (DTIM), posteriormente reconoce la beacon que transporta su segmento de página mediante el elemento de información (IE). Finalmente, las estaciones pueden volver al estado dormido y activarse solo en el momento de transmisión de su respectiva trama beacon [12].

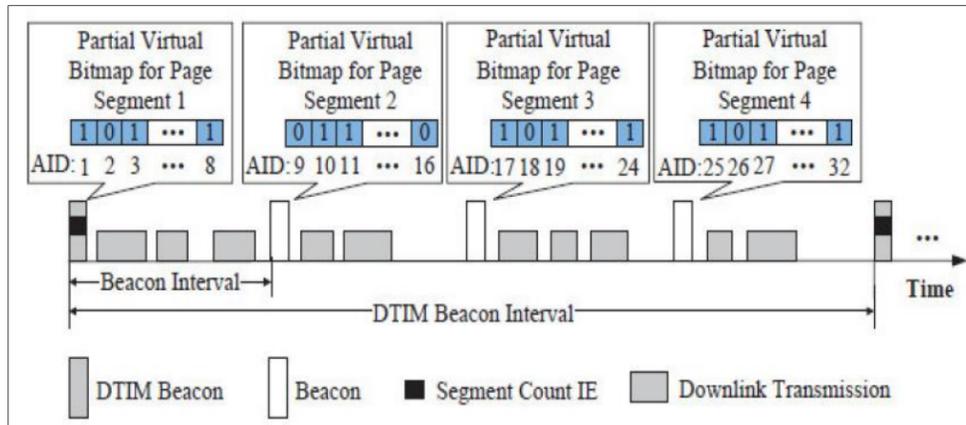


Figura 1.7 Diagrama de segmentación de páginas [12].

En IEEE 802.11ah, las estaciones que hacen uso de mecanismos de ahorro de energía están divididas en dos clases, las estaciones TIM y no TIM. Las estaciones TIM funcionan de manera muy similar a los demás estándares IEEE 802.11, en la cual la información de almacenamiento en búfer de paquetes de estas estaciones se incluye en el elemento de información (IE) y las estaciones pueden permanecer despiertas por periodos de tiempo largos. Mientras que en las estaciones no TIM se define un modo de ahorro de energía, el cual no incluye almacenamiento de búfer, puesto que asume que no hay necesidad de que la estación se despierte periódicamente para recibir la trama beacon, este concepto es aplicado especialmente en dispositivos sensores que funcionan a baja potencia [12].

1.4.3.2.3 Acceso al canal

En IEEE 802.11ah se implementa el concepto de Ventana de Acceso Restringido (RAW), que es un método diseñado para reducir las colisiones, permitiendo acceder al canal de una forma más eficiente. RAW se compone de varias ranuras de tiempo, donde el AP indica el momento en el cual la estación puede transmitir o recibir paquetes. Por ejemplo, evita demoras y pérdidas considerables en el acceso al canal cuando un gran número de estaciones no TIM se despierta al mismo tiempo. En [12] [3] se describe el comportamiento de RAW.

Aplicando este método el AP coordina los enlaces de acceso de estaciones y define intervalos de tiempo de RAW en los que solo algunas clases de dispositivos específicas recibirán el acceso al medio compartido [14].

La Figura 1.8 muestra el proceso RAW para la entrega de paquetes, en el que durante el RAW 1, el AP asigna a cada estación TIM un intervalo de tiempo para la transmisión [12], tanto para enlace ascendente como descendente.

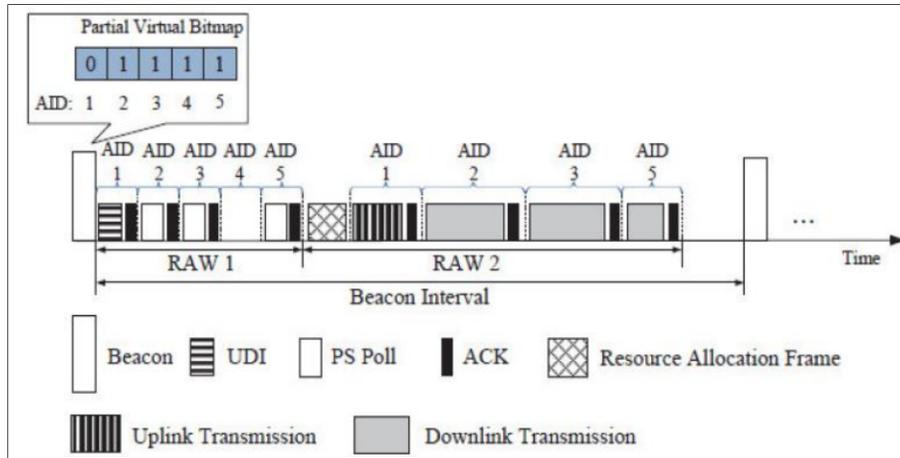


Figura 1.8 Entrega de datos utilizando RAW [12].

1.4.3.2.4 Mejoras de rendimiento

En sistemas IoT la sobrecarga que se asocia a la cabecera MAC de las tramas es considerable en comparación al tamaño de la carga útil. IEEE 802.11ah introduce un formato de tramas compactas para disminuir este comportamiento, aumentando así la eficiencia y el rendimiento global de la red [12].

La nueva cabecera MAC incluye solo dos campos de direcciones obligatorios, cambiando los cuatro campos presentes en la cabecera MAC tradicional. La Figura 1.9 muestra el cambio de la cabecera IEEE 802.11ah en la que no se incluye el campo de Calidad de Servicio (QoS) y alto rendimiento (HT), los cuales fueron desplazados a la cabecera física, el campo duración/ID es removido puesto que no se realiza una detección de portadora virtual. Así, la cabecera es capaz de reducir la sobrecarga de 30 Bytes a 18 Bytes [14].

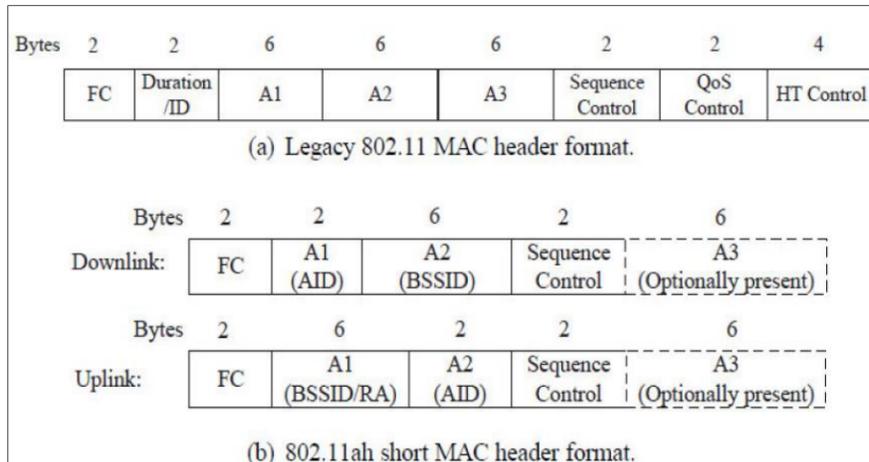


Figura 1.9 Encabezados MAC entre 802.11 y 802.11ah [12].

Una segunda solución de mejora de rendimiento es reducir las tramas de control MAC, IEEE 802.11ah utiliza el término paquetes de datos nulos (NDP), donde el encabezado MAC y el campo FCS se eliminan, de modo que la trama solo contenga el campo de encabezado PHY como se muestra en la Figura 1.10. Diferentes tramas de control (CTS), (ACK), (PS-Poll) son sustituidas por tramas NDP reduciendo la sobrecarga de protocolo [12]

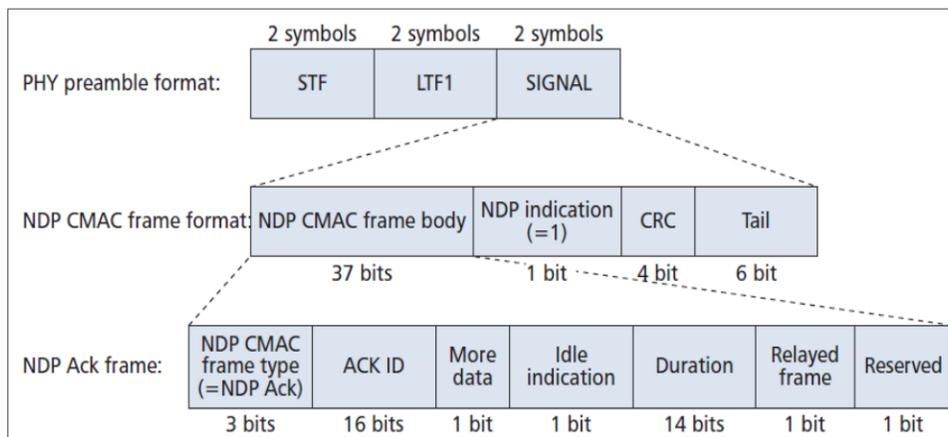


Figura 1.10 Formato de la trama NDP ACK [16].

2 METODOLOGÍA

En este capítulo se presentan los escenarios de simulación, la configuración, el diseño e implementación de la tecnología IEEE 802.11ah.

El trabajo está basado principalmente en describir las características, estructura y funcionalidades de la tecnología IEEE 802.11ah para su estudio en sistemas IoT.

En la sección 2.1 se definen los escenarios a implementarse en el simulador NS-3, teniendo en cuenta el tipo de ambiente a estudiar, la sección 2.2 permite conocer los modelos y consideraciones de medidas aplicados en la tecnología, seguido de las propiedades de la tecnología donde se describen los componentes, características y parámetros utilizados para el funcionamiento del módulo IEEE 802.11ah-ns3 presentes en la sección 2.3.

Finalmente se realiza la implementación de los escenarios en NS-3 utilizando el módulo para IEEE 802.11ah el cual permiten la recolección de datos para el posterior análisis, presentando su configuración y simulación en la sección 2.4.

2.1 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN IEEE 802.11AH.

Para realizar el análisis del comportamiento de la tecnología IEEE 802.11ah en sistemas IoT, se han escogidos escenarios para ambientes interiores (indoor) y exteriores (outdoor), los cuales se describen a continuación.

2.1.1 PRIMER ESCENARIO

El primer escenario con el que se va a trabajar se define en un ambiente interior (indoor), el mismo que se muestra en la Figura 2.1. Para este escenario se trabajará a una frecuencia de 900 MHz y se considera una distancia máxima entre estaciones (nodos) y el AP de 100 m, esto representa un área interior extensa. Los dispositivos (nodos) que conforman la red se encuentran fijos y su ubicación alrededor del AP se realiza de forma aleatoria, cumpliendo con la distancia previamente establecida.

Este ambiente puede ser considerado como una implementación tanto en áreas rurales como urbanas que necesitan de gran cantidad de dispositivos conectados ya sea para monitoreo, control u otras aplicaciones.

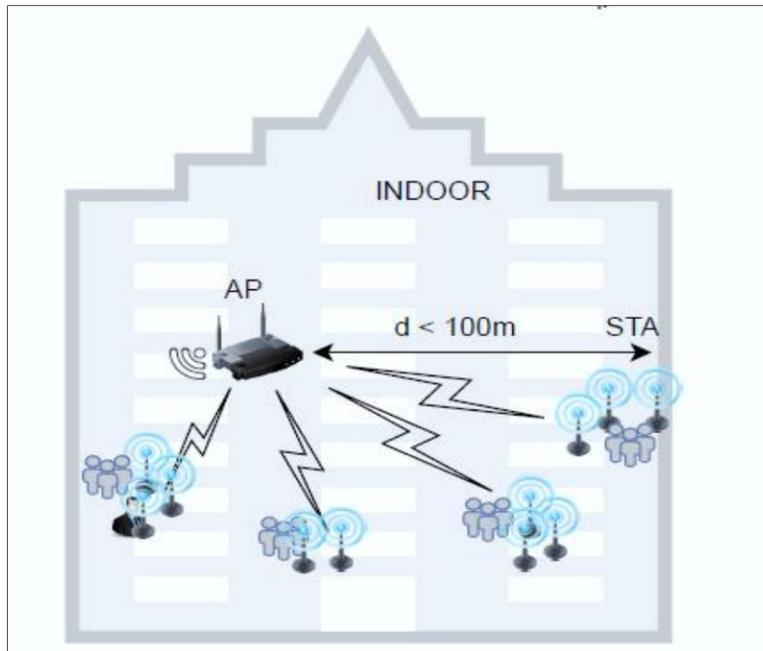


Figura 2.1 Diagrama escenario 1: estaciones fijas en ambiente indoor.

En la Tabla 2.1 se describen las características de parámetros utilizados para observar el comportamiento de un escenario interior.

Tabla 2.1 Características de parámetros para escenario 1

ESCENARIO 1	
Parámetros	Características
Esquema de codificación y modulación (MSC)	Fijo, MSC0_2
Velocidad de transmisión	Fijo, 650 Kbps
Distancia STA/AP	Variable, (10 -100 m)
Número de nodos	Variable, (50 - 500 nodos)
Número de conjunto de parámetros RPS	Fijo, (2 RPS)
Ancho de banda	Fijo, (2 MHz)
Tamaño de la carga útil	Variable, (60 - 1920 bytes)

2.1.2 SEGUNDO ESCENARIO

El segundo escenario propuesto se presenta en la Figura 2.2, en este caso se utiliza un ambiente exterior (outdoor), con estaciones fijas y con una distancia entre estaciones al AP mayor respecto al escenario anterior asumiendo un rango de 100 a 700 metros, con un ancho de banda (AB) y esquema de codificación adecuado para alcanzar un rango de transmisión extenso, considerando que existen algunos factores propios de las tecnologías inalámbricas que producen un desvanecimiento de la señal cuando se establece el enlace, a una frecuencia de 900 MHz.

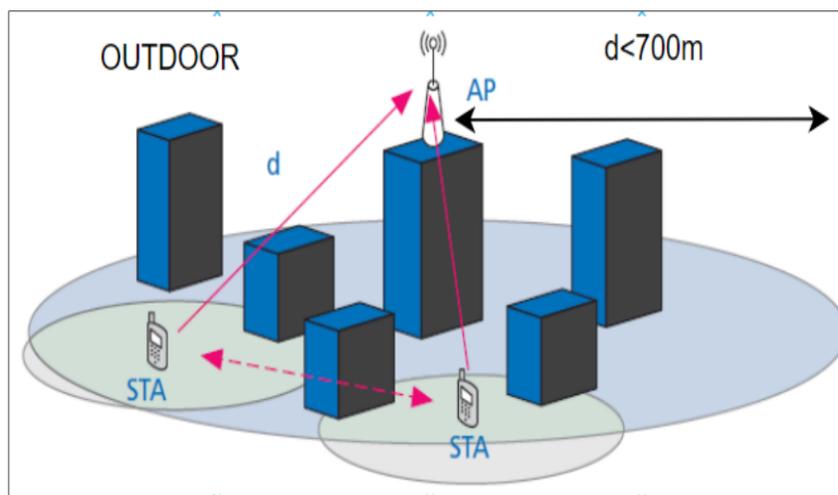


Figura 2.2 Diagrama escenario exterior estático [16].

En la Tabla 2.2 se describen las características de los parámetros utilizados para observar el comportamiento de un escenario exterior con estaciones estáticas.

Tabla 2.2 Características de parámetros escenario 2

ESCENARIO 2	
Parámetros	Características
Esquema de codificación y modulación (MSC)	Fijo, MSC0_1
Velocidad de transmisión	Fijo, 300 Kbps
Distancia STA/AP	Variable, (100 – 700 m)
Número de nodos	Variable, (10 - 500 nodos)
Número de conjunto de parámetros RPS	Fijo, (2 RPS)
Ancho de banda	Fijo, (1MHz)
Tamaño de la carga útil	Variable (60 - 960 bytes)

2.1.3 TERCER ESCENARIO

El tercer escenario planteado para la simulación, se lo presenta en la Figura 2.3, el cual se plantea en un ambiente de exteriores (outdoor) e incluye estaciones móviles. Este escenario representa otra de las aplicaciones que se pueden tener con la tecnología IEEE 802.11ah. Para este escenario, las estaciones se mueven con una velocidad constante y el AP se encuentra en el centro.

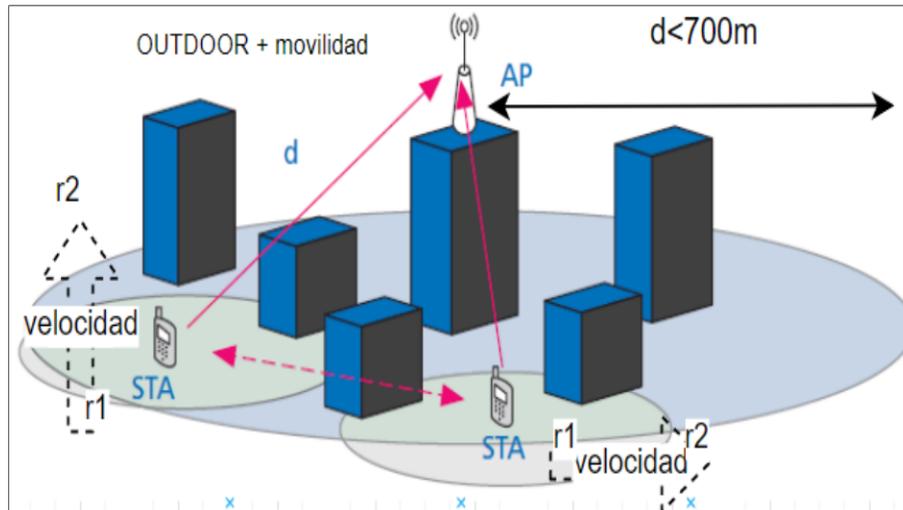


Figura 2.3 Diagrama escenario con movilidad [16].

En la Tabla 2.3 se describen las características de los parámetros utilizados para observar el comportamiento de un escenario exterior con estaciones móviles.

Tabla 2.3 Características de parámetros escenario 3

ESCENARIO 3	
Parámetros	Características
Esquema de codificación y modulación (MSC)	Fijo, MSC0_1
Velocidad de transmisión	Fijo, 300 Kbps
Distancia STA/AP	Fijo, (400 m)
Número de nodos	Variable, (20 - 400 nodos)
Número de conjunto de parámetros RPS	Fijo (2 RPS)
Ancho de banda	Fijo (1MHz)
Tamaño de la carga útil	Variable (60 - 1280 bytes)
Velocidad de movimiento	Variable (1 – 40 m/seg)

2.2 CONSIDERACIONES EN ESCENARIOS IEEE 802.11AH

A continuación, se presentan algunas consideraciones que permiten determinar las métricas para observar el comportamiento de la tecnología IEEE 802.11ah, aplicados a los escenarios descritos anteriormente. Esto incluye modelos de pérdidas de propagación para diferentes ambientes como también la medición del rendimiento y pérdidas de paquetes.

2.1.1 MODELO PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN PARA IEEE 802.11AH

Los modelos de pérdidas de propagación utilizados para cada escenario son los propuestos por el grupo de trabajo TGah, que pueden adaptarse a objetos de clases establecidas para redes inalámbricas en el simulador NS-3.

2.1.1.1 Modelo para ambiente interior (indoor)

Para un ambiente interior de tamaño considerable, las pérdidas de trayecto se basa en un modelado definido para IEEE 802.11n, con la reducción de la banda de frecuencia a la que opera. Según este modelo, la señal se propaga en espacio libre hasta una distancia determinada como el punto de quiebre (dBp), establecida en 10 m para ambientes interiores de gran tamaño [14], antes del punto de quiebre se tiene pérdidas representadas en la ecuación 2.1; mientras que para distancias mayores a este punto el cálculo viene dado por la ecuación 2.2

$$PL(d) = L_{FS} = 20 \log_{10}((4\pi fd)/c) \text{ para } d \leq d_{BP} \quad (2.1)$$

$$PL(d) = L_{FS} + 3.5 \log_{10}(d/d_{BP}) \text{ para } d > d_{BP} \quad (2.2)$$

Donde:

$PL(d)$: es la pérdida de la trayectoria en dB en función de la distancia.

d : Distancia entre el AP y las estaciones en metros

f : Frecuencia central de la portadora en MHz

c : Velocidad de la luz en m/s

d_{BP} : Distancia al punto de quiebre.

2.1.1.2 Modelo para ambiente exterior (outdoor)

Para el caso de ambientes en exteriores se utiliza la ecuación 2.3, donde se define un modelo de pérdidas en implementaciones de gran tamaño, con antenas de transmisión colocadas a una determinada altura, con una portadora a una frecuencia de 900 MHz.

$$PL(d) = 8 + 37.6 \log_{10}(d) \quad (2.3)$$

Donde:

d : Distancia entre el AP y las estaciones en metros

Otro modelo de pérdidas utilizado para ambientes exteriores poblados, es decir con una mayor cantidad de dispositivos conectados, que permiten implementar aplicaciones IoT viene dado por la ecuación 2.4.

$$PL(d) = L_0 + 10n_0 \log_{10}(d) \quad (2.4)$$

Donde:

L_0 : Pérdida de trayectoria.

d : Distancia entre el AP y las estaciones en metros

n_0 : Representa el exponente de pérdida de trayectoria dependiendo del tipo de entorno de la aplicación.

2.1.2 RENDIMIENTO IEEE 802.11AH

El rendimiento es la capacidad del enlace para transportar información en un determinado periodo de tiempo. Para el cálculo del rendimiento (R) en IEEE 802.11ah se tienen algunas condiciones del canal y el valor viene dado por la ecuación 2.5.

$$R = \frac{(P_{UL} + P_{DL}) * L_{data} * 8}{T_{message}} \quad (2.5)$$

Donde:

L_{data} : Tamaño de la carga útil en bytes.

P_{UL} : Número de paquetes enlace ascendente

P_{DL} : Número de paquetes enlace descendente

$T_{message}$: Duración en segundos de la ejecución y su valor viene dado por la ecuación 2.6.

$$T_{message} = DIFS + T_{DATA} + SIFS + T_{ACK} + T_{BACKOFF} + 2\delta \quad (2.6)$$

Donde:

DIFS y SIFS son espacios entre tramas, donde para IEEE 802.11ah tienen un valor de 160 y 264 us respectivamente.

δ : Retraso de propagación.

T_{ACK} : Duración de una trama ACK.

T_{DATA} : Tiempo de transmisión de una trama de datos.

2.1.3 PÉRDIDAS DE PAQUETES IEEE 802.11AH

El porcentaje de paquetes que se pierden cuando se establece la comunicación de los dispositivos que utilizan tecnología IEEE 802.11ah viene dada por la ecuación 2.7.

$$\%PP = \left(1 - \frac{total\ paquetes\ exitosos}{total\ paquetes\ enviados}\right) * 100 \quad (2.7)$$

2.3 MÓDULO IEEE 802.11AH EN EL SIMULADOR NS-3

En el presente trabajo, para analizar el comportamiento de los escenarios planteados, se utiliza el módulo IEEE 802.11ah para ns-3 implementado por Tian, Deronne, Latré y Famaey en [1] [17], el cual consiste en modelos de capa física para comunicaciones por debajo de frecuencias de 1 GHz.

Este módulo se encuentra empaquetado sobre la versión 2.23 del simulador y toma como referencia modelos existentes como IEEE 802.11n, por lo cual no se instala como un

módulo que puede ser manejado de forma individual sino más bien como una actualización completa para todo el paquete de NS-3.

En el simulador el módulo IEEE 802.11ah contiene varias características como son: una interfaz de configuración de acceso al canal aplicando el concepto de ventana de acceso restringido (RAW), implementación que permite obtener una asociación rápida al AP y una segmentación del mapa de indicación de tráfico (TIM) que permite que las estaciones ahorren energía cuando no transmiten información.

Este módulo será modificado para obtener un comportamiento de acuerdo con los escenarios de simulación planteados y al tipo de ambiente, modificando algunos parámetros adaptables.

La estructura y características del módulo se presentan a continuación.

2.3.1 COMPONENTES DEL MÓDULO IEEE 802.11AH

Los componentes y clases del módulo IEEE 802.11ah en ns-3 se muestran en la Figura 2.4, donde se puede observar que consta de 4 componentes principales como el canal físico, la capa Wi-Fi física del módulo IEEE 802.11ah, la capa baja de MAC y la capa alta de MAC que permiten su correcto funcionamiento.

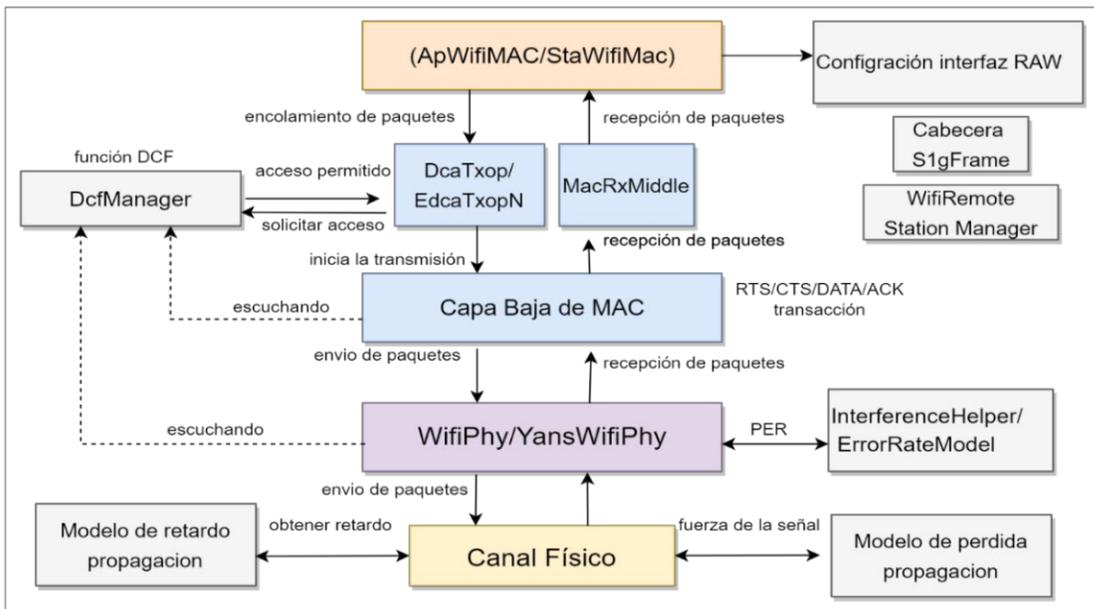


Figura 2.4 Componentes del módulo IEEE 802.11ah-ns3 [17].

2.3.1.1 Canal Físico Inalámbrico (Wi-Fi)

Este componente se describe como una aproximación del canal de transmisión de datos, incluye el modelo de pérdida de propagación y el modelo de retardo. El modelo de pérdida de propagación implica una pérdida de intensidad de la señal durante la transmisión a través del aire y depende en gran parte al tipo de ambiente que se utilice, ya sea para ambientes interiores o exteriores, mientras que el modelo de retardo describe el retraso que existe en la transmisión durante la comunicación entre dos nodos, la configuración del canal se puede observar en la Figura 2.5. La clase que permite modelar este canal es la *WifiChannel* y se encuentra en el directorio *model*.

```
//construccion del canal fisico
    YansWifiChannelHelper channelBuilder = YansWifiChannelHelper();
    channelBuilder.AddPropagationLoss("ns3::Cost231PropagationLossModel", "Lambda", DoubleValue (3e8/900e6),
(900e6), "BSAntennaHeight", DoubleValue (15), "SSAntennaHeight", DoubleValue (1.2), "MinDistance", DoubleValue (0.5
propagacion
    channelBuilder.SetPropagationDelay("ns3::ConstantSpeedPropagationDelayModel"); //Modelo de retardo
    Ptr<YansWifiChannel> channel = channelBuilder.Create();
    channel->TraceConnectWithoutContext("Transmission", MakeCallback(&onChannelTransmission));
```

Figura 2.5 Construcción del canal físico IEEE 802.11ah-ns3

2.3.1.2 Capa Wi-Fi Física (Phy)

La parte de capa física PHY del módulo IEEE 802.11ah es un componente donde se define el formato de la unidad de datos del protocolo (PPDU) que se envían y reciben a través del canal inalámbrico Wi-Fi.

Consiste en las clases para diseño de la capa física *YansWifiPhy*, *InterferenceHelper* y *ErrorRateModel* de *ns-3*, las cuales realizan operaciones y funciones comunes y específicas para su diseño.

La clase *WifiPhyLayer* presente en la carpeta *model* es la que ayuda a la formación de la capa y su configuración en *ns3* se puede observar en la Figura 2.6

```

//construccion del modelo de capa fisica
YansWifiPhyHelper phy = YansWifiPhyHelper::Default();
//configuracion parametros asignados a las estaciones
phy.SetErrorRateModel("ns3::YansErrorRateModel");
phy.SetChannel(channel);
phy.Set("ShortGuardEnabled", BooleanValue(false));
phy.Set("ChannelWidth", UintegerValue(getBandwidth(config.DataMode)));

```

Figura 2.6 Construcción de la capa física IEEE 802.11ah-ns3

El *ErrorRateModel*, permite calcular la tasa de error de paquetes de 802.11ah con soporte de los esquemas de modulación para IEEE 802.11ah.

La clase *YansWifiPhy* decide según la potencia de la señal y la interferencia presentada si el paquete fue exitoso o no. Actualmente la clase trabaja en conjunto con otros cinco objetos descritos en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Objetos de clase YansWifiPhy en ns3.

Objetos	Descripción
Entidad Física (PhyEntity)	Contiene la parte específica del procesamiento de capa PHY
WifiPpdu	Modela la unidad de datos del protocolo de la capa física.
WifiPhyStateHelper	Mantiene la máquina de estado PHY
InterferenceHelper	Rastrea todos los paquetes observados en el canal
ErrorModel	Calcula una probabilidad de error para un SNR dado

La clase *WifiPhyStateHelper* en ns3 es la que administra y mantiene el estado de la capa física y permite que otros objetos se conecten en modo escucha (*listener*) para monitorear el estado de la capa física, informando a la capa MAC si está ocupada o no, ayudando así en la transmisión de datos y previniendo la existencia de colisiones.

2.3.1.3 Capa Baja de MAC

Las clases para la capa baja de MAC del módulo IEEE 802.11ah implementan el control de acceso al medio utilizando tramas de control RTS/CTS/DATA/ACK, modelan funciones de acceso al medio como la función de canal distribuido mejorado (EDCA), parte de RAW, colas de paquetes, fragmentación, retransmisión y control de velocidad. Entre las funciones principales para este componente se encuentran (*MacLow*, *DcaTxop/EdcaTxopN*, *MacRxMiddel* y *WifiStationManager*).

2.3.1.4 Capa Alta de MAC

Implementa procesos para la comunicación entre nodos, como también funciones de gestión para la generación de beacons, sondeo, asociación rápida y parte de RAW.

Consiste en las clases *ApWifiMac* utilizado para la gestión del punto de acceso (AP) y *StaWifiMac* para las estaciones. La clase *ApWifiMac* implementa un AP que permite aceptar la asociación y que genera beacons de forma periódica.

2.3.2 CARACTERÍSTICAS DE LA CAPA FÍSICA

Para la capa física, el simulador admite los esquemas de modulación y codificación definidos para anchos de banda de canal de 1 y 2 MHz, excepto MCS1_10 para canales de 1 MHz que requiere una tasa de codificación de $\frac{1}{2}$ el cual no se encuentra implementado y no tiene soporte dentro del modulo IEEE 802.11ah.

La capa física permite controlar y verificar el estado en el que se encuentran las estaciones asociadas al AP para identificar el consumo de energía de cada estación, la descripción de cada estado se muestra en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Estados de la capa física.

Estado	Descripción
Transmisión (TX)	La capa física se encuentra transmitiendo una señal.
Recepción (RX)	Está con una señal y esperando hasta que haya recibido su último bit para enviarlo a la capa MAC.
Ocupado (CCA_BUSY)	No se encuentra en estado TX o RX, pero la energía medida es superior al umbral de detección de energía.
Inactivo (IDLE)	No está en los estados TX, RX o CCA_BUSY.
Dormido (SLEEP)	Se encuentra en modo de ahorro de energía, no envía ni recibe tramas.
Apagado (OFF)	No se envía ni recibe tramas.

2.3.3 CARACTERÍSTICAS DE LA CAPA DE ACCESO AL MEDIO (MAC)

La tecnología IEEE 802.11ah presenta varias funciones novedosas en la capa MAC respecto a otras tecnologías inalámbricas con el objetivo de abordar los requisitos de IoT en redes densas. Entre las novedades de esta capa se encuentran los mecanismos mencionados en la parte teórica como asociación rápida y RAW modificados en las clases ya existentes del simulador ns-3.

La función de asociación rápida reduce el tiempo de respuesta cuando una gran cantidad de estaciones intentan asociarse al mismo tiempo con el AP. Un elemento de control de autenticación que contiene un umbral se transmite a todas las estaciones que envían una solicitud de asociación en la trama de *beacon*, si no logra conectarse la pospone hasta la siguiente *beacon*. El AP ajusta dinámicamente el umbral para permitir que todas las estaciones se asocien a su debido tiempo.

El objetivo del mecanismo RAW es reducir las colisiones y mejorar el rendimiento. Los parámetros relacionados con RAW se pueden preconfigurar a través de los atributos de la clase *ApWifiMac*, el AP genera un elemento para el conjunto de parámetros (RPS) con la configuración predefinida y lo adjunta a cada trama de *beacon*. El RPS solo se puede configurar de forma estática y no se puede cambiar una vez que la simulación comienza a ejecutarse, incluso si se han producido cambios en las condiciones de la red.

2.3.4 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE IEEE 802.11AH EN NS-3

Como el modelo de consumo de energía funciona junto con RAW y TIM en el simulador IEEE 802.11ah, el componente para la configuración RAW interactúa con la clase *ApWifiMac* y cualquier algoritmo de optimización RAW, entonces las clases (*StaWifiMac* y *DcaTxop/EdcaTxopN*) se modifican para permitir que las estaciones cambien entre los distintos estados de la capa física.

La segmentación TIM indica la existencia de tráfico en el enlace, su configuración se realiza en los elementos de información como el segmento de página (PS) y el elemento TIM. El elemento TIM se transmite con cada *beacon*, mientras que el elemento PS se transmite cada n-ésimo *beacon*, donde n se encuentra definido en el elemento TIM.

2.3.4.1 Interfaz de configuración RAW

En escenarios realistas, el AP normalmente no tiene conocimiento previo sobre el tráfico de cada estación. Para agrupar estaciones de manera eficiente, el AP necesita estimar los patrones de tráfico en función de la información de transmisión del paquete.

El simulador presenta una interfaz de configuración RAW definida por el usuario. El algoritmo de configuración RAW se ejecuta cuando el AP genera la trama de beacon.

Como se muestra la Figura 2.7, el AP llama a la función presente en la clase *S1gCtrl* para realizar la actualización de los parámetros, luego el AP adjunta el elemento de conjuntos de parámetros RAW (RPS) que lleva toda la información de estos y son devueltos al beacon para ser transmitidos a todas las estaciones. La lista de parámetros devueltos representa información sobre la red necesarios para determinar y actualizar los nuevos parámetros.

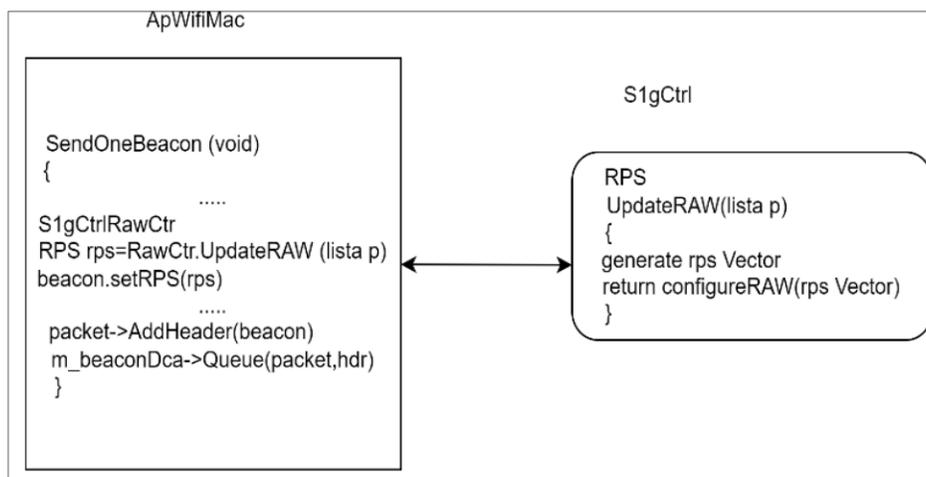


Figura 2.7 Interfaz de configuración RAW [17].

2.3.4.2 Modelo de consumo de energía

Para obtener el valor de la cantidad de energía consumida se utiliza el modelo de consumo y transición de estado, teniendo en cuenta los diferentes estados en los que se pueden encontrar las estaciones ya sea de TX, RX, IDLE y SLEEP.

La energía consumida por una estación IEEE 802.11ah depende del consumo que cada estación obtenga en un determinado estado y el tiempo de permanencia de las estaciones en dicho estado, como se muestra en la ecuación 2.8. También se puede medir el consumo de energía dependiendo del número de estaciones, teniendo en cuenta su agrupación, lo que permite administrar mejor el acceso al canal y la estación puede entrar en modo de suspensión cuando no está en su ranura o no tiene paquetes para transmitir.

$$E_{AH} = T_s * E_s \quad (2.8)$$

Donde:

E_{AH} : Consumo de energía de una estación en IEEE 802.11ah

T_s : Tiempo que el dispositivo pasa en cada estado determinado.

E_s : Consumo de energía correspondiente de ese estado.

RAW y TIM permiten que las estaciones duerman fuera de sus espacios asignados, ahorrando así energía. La suspensión se inicia llamando a la función `GetPhy()` representada en la Figura 2.8 de la clase de capa baja de MAC, en la cual las estaciones se encuentran en estado *sleep*.

```
//cuando se asocian las estaciones
if (nodos[node]->isAssociated)
{
    switch (state)
    {
        case WifiPhy::State::SLEEP: //Sleep
            timeSleepArray[node] = timeSleepArray[node] + duration;
            break;
    }
}
```

Figura 2.8 Estados de las estaciones IEEE 802.11ah-ns3

Cuando la estación recibe la beacon, calcula cuándo comenzará su intervalo RAW y luego entra en modo de suspensión hasta que comience su intervalo asignado. En este momento, la estación se despierta y verifica si tiene paquetes en su cola de transmisión. Si es así, comienza a competir por el canal con los otros dispositivos activos en la ranura, de lo contrario, vuelve al modo de suspensión para ahorrar energía. La estación también se activará si llega un paquete a su cola de transmisión en medio de una ranura a la que puede acceder. Si la estación todavía está despierta al final del espacio compartido o RAW asignado, también volverá a dormir. Finalmente, la estación siempre se despertará

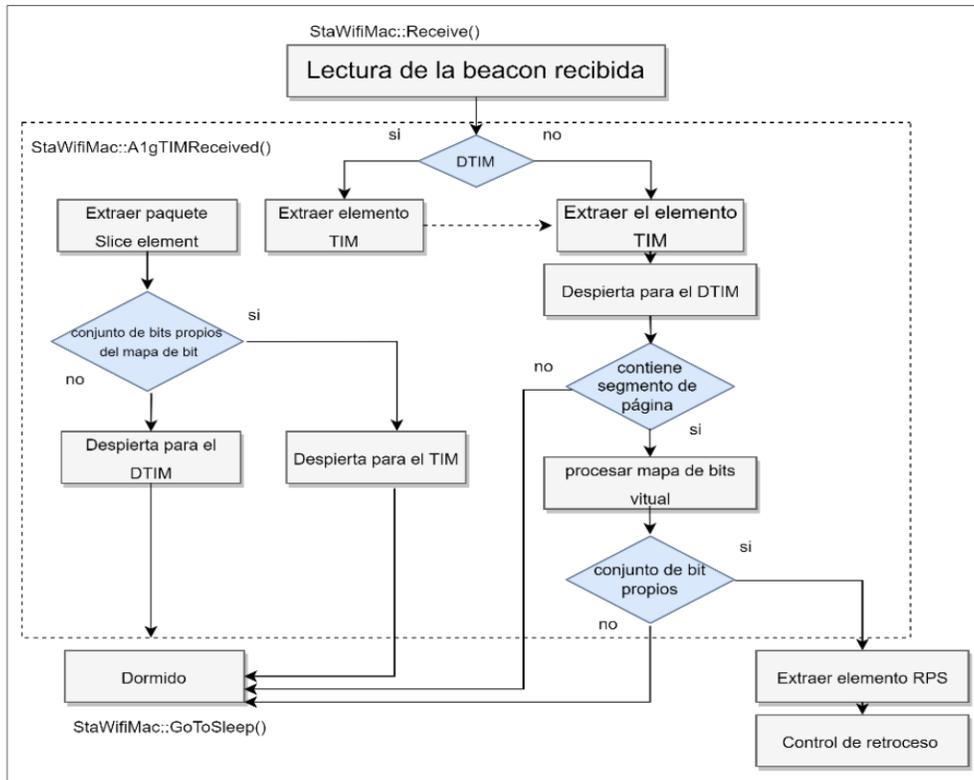


Figura 2.10 Manejo de la segmentación TIM [17].

2.4 IMPLEMENTACIÓN DE IEEE 802.11AH EN NS-3

Esta sección describe la configuración y puesta en marcha de los escenarios IEEE 802.11ah propuestos con el objetivo de obtener medidas de rendimiento y porcentaje de paquetes perdidos en la red, mediante el uso del software para simulación de redes Network Simulator 3 (NS-3) el cual es de código abierto, trabaja con licencia pública, utiliza en este caso un entorno Unix (Ubuntu) y es constantemente aportada por usuarios en repositorios digitales como GitHub.

En la figura 2.11 se presenta un diagrama general de la composición del módulo con las diferentes clases utilizadas para el funcionamiento de la tecnología IEEE 802.11ah, en el cual se tiene una clase principal que contiene el código fuente llamada *s1g-test-tim-raw*, esta clase utiliza algunos parámetros propios para el funcionamiento y está complementada por la clase denominada *configuration* que contiene parámetros de configuración ingresados inicialmente para la simulación. También utiliza otras clases adicionales como *Statistics* y *SimulationEventManager*, la clase *Statistics* realiza un almacenamiento de información de los eventos realizados en la simulación y trabaja simultáneamente con *NodeStatistics* para enviar información de cada nodo, lo que permite

obtener datos de potencia y energía durante la transmisión o recepción de paquetes. La clase *SimulationEventManager* se encarga de supervisar que cada evento sea realizado correctamente, enviando los datos a la clase *SimpleTCPClient* para su posterior análisis en el visualizador de IEEE 802.11ah (*ahVisualizer*). Durante este proceso la clase *NodeEntry* es la encargada de enviar actualizaciones de estado de los nodos para así obtener la mayor cantidad de información.

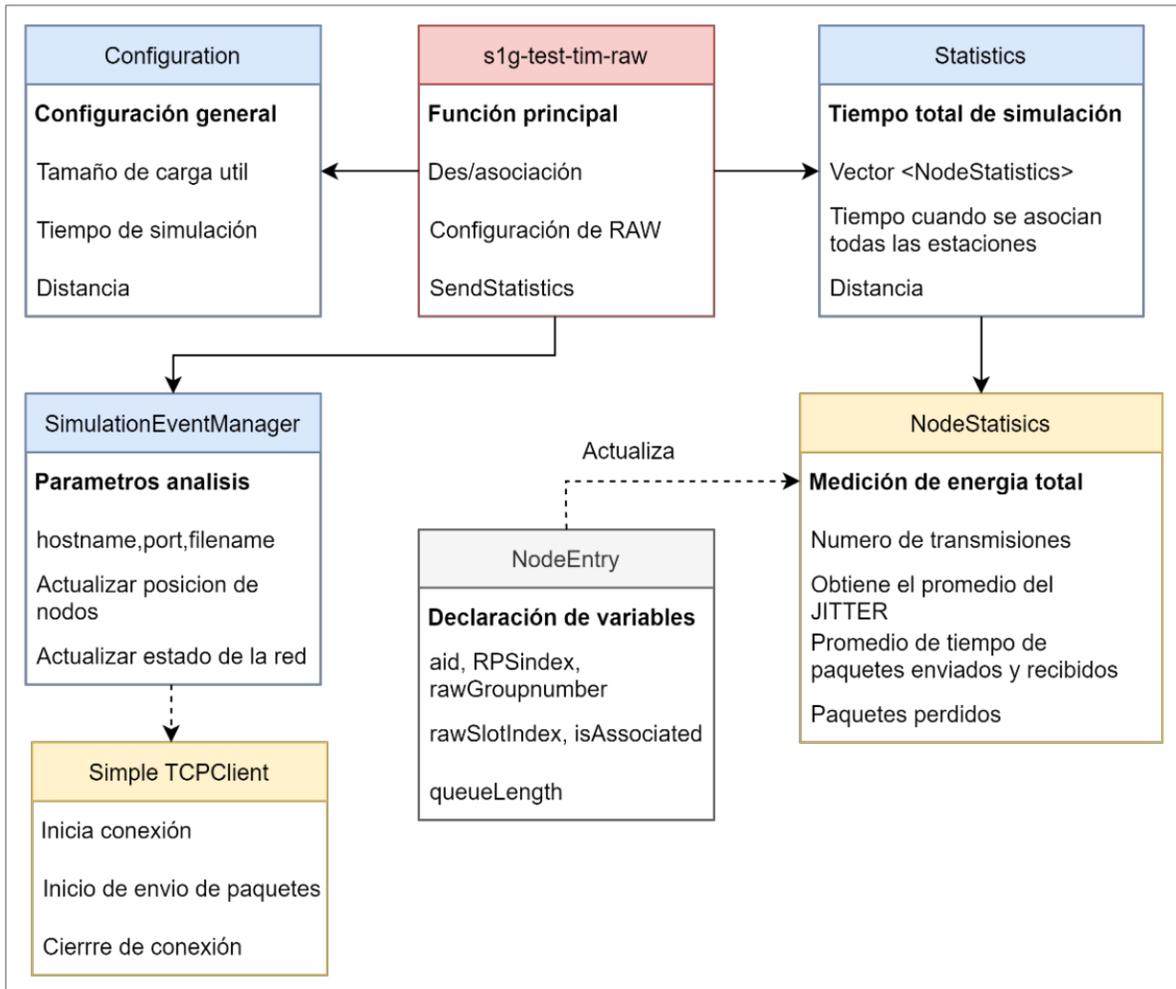


Figura 2.11 Descripción de clases IEEE 802.11ah en ns3

2.4.1 CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS PARA ESCENARIOS

En todos los escenarios de simulación se consideran un solo punto de acceso (AP), el cual se encuentra estático y ubicado en el centro de las estaciones. Los parámetros predeterminados de las capas física (PHY) y de control de acceso al medio (MAC) para la

simulación se presentan en la Tabla 2.6, teniendo en cuenta que varían dependiendo del escenario elegido.

Tabla 2.6 Parámetros utilizados capa PHY y MAC.

PARÁMETROS	VALOR
Frecuencia	Sub-1GHz (900 MHz)
Potencia de transmisión	0 dBm
Ganancia de transmisión	0 dB
Ganancia de recepción	3 dB
Figura de ruido	3 dB
Modelo de pérdida de propagación	Indoor, Outdoor
Modelo de tasa de error	YansErrorRate
Tamaño de la carga útil	Variable
Tipo de encabezado MAC	Heredado
Intervalo beacon	0.1024 s
Tiempo de simulación	60 s
Distribución de las estaciones	Aleatorio
Algoritmo de control de velocidad	Constante

En la Figura 2.12 se muestra la configuración de parámetros generales para el modelamiento del canal físico en escenarios IEEE 802.11ah en ns-3.

```

phy.Set("TxGain", DoubleValue(3.0));
phy.Set("RxGain", DoubleValue(3.0));
phy.Set("TxPowerLevels", UIntegerValue(1));
phy.Set("TxPowerEnd", DoubleValue(0.0));
phy.Set("TxPowerStart", DoubleValue(0.0));
phy.Set("RxNoiseFigure", DoubleValue(3.0));

apDevice = wifi.Install(phy, mac, wifiApNode);

```

Figura 2.12 Configuración de parámetros predeterminados en NS-3

Todas las estaciones usarán el mismo esquema de modulación y codificación (MCS) para un ancho de canal definido de 1 o 2 MHz que son los recomendados actualmente por el grupo de trabajo de IEEE 802.11ah.

La ubicación de las estaciones es de forma aleatoriamente alrededor del AP y está dado por una distancia “rho” definida en el archivo de configuración. Posteriormente, las estaciones se asocian con el AP mediante el nuevo mecanismo de asociación rápida, en la que todas las estaciones generan paquetes y los envían al AP en sus ranuras RAW asignadas. Finalmente, cuando culmina el tiempo de simulación definido por el usuario todas las estaciones dejan de generar paquetes nuevos y comienzan a transmitir solo paquetes que aún están en su búfer.

Para obtener el consumo de energía, se toma como medida el tiempo de transmisión total, el tiempo de recepción y el tiempo de suspensión para cada estación simulada, considerando que los valores cambian dependiendo de cada estado, por ejemplo, en el estado dormido (SLEEP) la estación se apaga, el valor de energía consumida es insignificante y se puede suponer que tiene un valor de cero.

Cuando se realiza la simulación del escenario con movilidad las estaciones poseen una velocidad constante controlada por la clase `ConstantVelocityMobilityModel` y su configuración se presenta en la Figura 2.13.

```
Ptr<ConstantVelocityMobilityModel> mob = wifiStaNode.Get(0)->GetObject<ConstantVelocityMobilityModel>();
Vector pos = mob->GetPosition ();
std::cout << "POS: x=" << pos.x << ", y=" << pos.y << ", z=" << pos.z<< std::endl;

mob->SetVelocity (Vector(2,0,0)); //control de la velocidad con la clase setvelocity del ConstantVelocity
```

Figura 2.13 Configuración de la clase `ConstantVelocityMobilityModel` en NS-3

A continuación, se describe la configuración de algunos otros parámetros específicos para el funcionamiento de los escenarios descritos utilizando la tecnología IEEE 802.11ah en NS-3.

2.4.1.1 Parámetros relacionados con RAW

En la tabla 2.7 se muestra la configuración general de los parámetros RAW especificados por un archivo de texto en la carpeta (*OptimalRawGroup*) y declarado en el archivo de configuración (*configuration.h*) para poder ser interpretado por el algoritmo RAW de la función principal correspondiente, este archivo debe ser modificado antes de que se realice cada simulación.

Tabla 2.7 Configuración RAW para NS-3

PARÁMETROS CONFIGURACIÓN RAW							
Número de conjuntos de parámetros RAW (RPS) que se transmiten en las beacons							
Grupos RAW que contiene el primer RPS para las estaciones respectivas							
Raw Control	CrossSlot Boundary	Slot Format	NRawSlot Count	NRawSlot Num	Page	Aid_start	Aid_end

Las características y descripción de los parámetros de configuración RAW anteriores se presentan en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Descripción parámetros algoritmo RAW

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Control RAW (RawControl)	Indica si cualquier estación dentro del grupo RAW definido puede acceder al canal cuando se configura en 0 o solo algunas establecidas.
Límite de ranura (CrossSlotBoundary)	Indica si las estaciones pueden transmitir después del límite de ranura RAW asignado cuando se encuentra en 1.
Formato de la ranura (SlotFormat)	Utilizado para el conteo de ranuras RAW, en 1 indica que el NRawSlotCount tiene una longitud de 11 bits y 8 bits cuando es 0.
Contador de las ranuras RAW (NRawSlotCount)	Utilizado para el cálculo de la duración de la ranura RAW
Número de ranuras (NRawSlotNum)	Está definido por cada grupo RAW y define en cuantas ranuras contiene el grupo.
Page	Índice de páginas del subconjunto de AIDs.
Estación de inicio (Aid_start)	Menor estación asignada al RAW.
Estación final (Aid_end)	Mayor estación asignada al RAW.

En un número de grupos RAW (NGroup), las estaciones se dividen uniformemente y la duración de la ranura está dada por la ecuación 2.9.

$$D_{RAW} = 500 \text{ us} + N_{RawSlotCount} * 120 \text{ us} \quad (2.9)$$

2.4.1.2 Parámetros del modo Wi-Fi

Los parámetros de configuración del módulo IEEE 802.11ah para el modo Wi-Fi que permiten establecer valores para el funcionamiento de modelos inalámbricos son definidos en la tabla 2.9 .

Tabla 2.9 Descripción parámetros modo Wi-Fi.

PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
DataMode	Modo de datos.
Datarate	Tasa de transmisión de datos para el modo escogido.
BandWidth	Ancho de banda del modo respectivo.

La relación entre los 3 parámetros de modo Wi-Fi y MCS para IEEE 802.11ah se observan en la Figura 2.14 y toman su valor dependiendo del respectivo ancho de banda escogido para cada escenario.

```

BandWidth = 1 Mhz
MCS      WifiMode
0        OfdmRate300KbpsBW1MHz
1        OfdmRate600KbpsBW1MHz
2        OfdmRate900KbpsBW1MHz
3        OfdmRate1_2MbpsBW1MHz
4        OfdmRate1_8MbpsBW1MHz
5        OfdmRate2_4MbpsBW1MHz
6        OfdmRate2_7MbpsBW1MHz
7        OfdmRate3MbpsBW1MHz
8        OfdmRate3_6MbpsBW1MHz
9        OfdmRate4MbpsBW1MHz
10       OfdmRate150KbpsBW1MHz

BandWidth = 2 Mhz
MCS      WifiMode
0        OfdmRate650KbpsBW2MHz
1        OfdmRate1_3MbpsBW2MHz
2        OfdmRate1_95MbpsBW2MHz
3        OfdmRate2_6MbpsBW2MHz
4        OfdmRate3_9MbpsBW2MHz
5        OfdmRate5_2MbpsBW2MHz
6        OfdmRate5_85MbpsBW2MHz
7        OfdmRate6_5MbpsBW2MHz
8        OfdmRate7_8MbpsBW2MHz

```

Figura 2.14 Relación entre MCS y WifiMode.

Los parámetros como el modo de datos, la velocidad de datos y el ancho de banda, se establecen dentro del archivo de configuración como se muestra en la Figura 2.15, Por ejemplo, MCS2_0 con un ancho de banda de 2 MHz, son "OfdmRate650KbpsBW2MHz", 0,650 y 2.

```
string DataMode = "MCS2_0";
double datarate = 0.650; //valor del la velocidad de los datos
double bandwidth = 2; //valor del ancho de banda
```

Figura 2.15 Configuración parámetros del modo Wi-Fi en ns3

2.4.1.3 Parámetros de segmento de página y TIM

La descripción y características de parámetros configurados en ns-3 para cumplir con el funcionamiento de TIM y segmentación de página dentro de los escenarios escogidos y que utiliza la tecnología IEEE 802.11ah se presentan en la tabla 2.10.

Tabla 2.10 Parámetros configurables de un segmento de página y TIM.

Parámetros	Descripción
Periodo de página (Page Period)	Número de intervalos de beacon (BI) entre dos DTIMs sucesivos. Para este caso un pagePeriod=2 cada 2 beacon es una beacon DTIM que transporta el elemento Page Slice para pageIndex=0
Índice de página (PageIndex)	Índice de la página cuyos segmentos se transportan durante los intervalos de beacon dentro de un período de página, el valor predeterminado es 0.
Longitud del segmento de página (PageSliceLength)	Número de bloques en cada TIM. Establecido en 1 por defecto
Contador de segmento de página (PageSliceCount)	Número de TIMs en un periodo de página. Para un pageSliceCount=2, 2 TIM están programados en un período de página.
Compensación de bloque (BlockOffset)	Compensación de bloque en el primer segmento de página. El valor predeterminado es 0.
Compensación de TIM (TimOffset)	Número de intervalos de beacon del DTIM a la beacon que lleva el primer segmento de página que está indicada en el DTIM. El valor predeterminado es 0.

2.4.1.4 Otros parámetros importantes en la simulación

Hay que considerar que existen otros parámetros que deben configurarse en la simulación del módulo IEEE 802.11ah, y que son modificables en la clase *configuration*.

Estos parámetros complementan el funcionamiento y manejo adecuado del módulo, sus características están descritas en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11 Otros parámetros de configuración en NS-3.

PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
<i>SimulationTime</i>	Indica el tiempo de duración en segundos de la simulación, se establece después que las estaciones logran asociarse con el AP.
<i>PayloadSize</i>	Tamaño de la carga útil que varía para observar el comportamiento de la tecnología.
<i>BeaconInterval (BI)</i>	Tiempo de intervalo beacon.
<i>Nsta</i>	Número de estaciones totales.
<i>rho</i>	Distancia máxima entre AP y estaciones.
<i>Seed</i>	Utilizado para definir una variable aleatoria <i>RandomVariableStream</i> .
<i>Archivo (file)</i>	Ruta de los archivos que contienen información de resultados.
<i>Pcapfile</i>	Ruta del archivo pcap utilizado por programas de análisis de datos.
<i>TrafficPath</i>	Incluye el tráfico de cada estación, el intervalo de envío de paquetes se puede calcular automáticamente en función del tamaño de la carga útil.
<i>S1g1MfieldEnabled</i>	Este parámetro permite controlar el ancho de banda del paquete establecido en 1 MHz si se establece en "verdadero".

2.4.2 SIMULACIÓN DE ESCENARIOS

En esta sección se presentan las simulaciones de los escenarios descritos anteriormente utilizando el módulo de IEEE 802.11ah-ns3 existente, tanto de forma gráfica como de forma plana que servirán para la recolección de datos y posterior análisis.

2.4.2.1 Diagramas de distribución

El escenario interior (indoor) con una distribución aleatoria de las estaciones respecto a su AP se presenta en la Figura 2.16 mediante el uso de la herramienta propia de IEEE 802.11ah (*ahVizualizer*) en NS-3. En el cual se establece que las estaciones se encuentran distribuidas alrededor del AP a distancias máximas variables que no excede los 100 metros y depende de las condiciones establecidas en el archivo de configuración.

Este escenario utiliza el modelo de pérdidas de propagación para interiores de gran tamaño y las medidas son tomadas en el momento que las estaciones logran establecer una asociación para iniciar con el intercambio de datos con su respectivo AP.

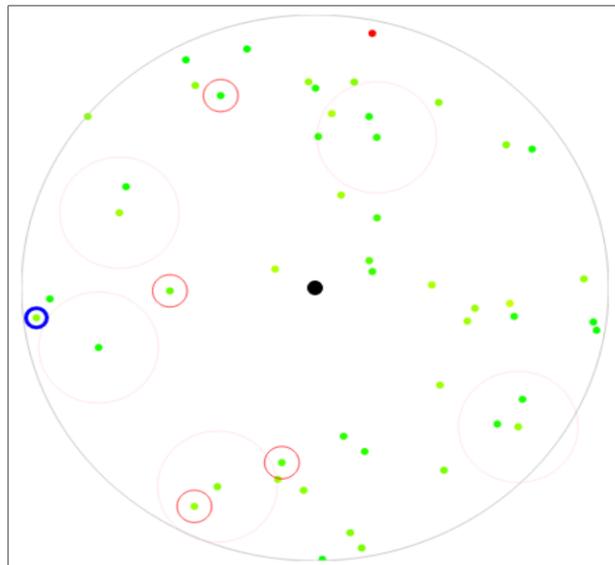


Figura 2.16 Distribución de estaciones escenario interior (*ahVizualizer*)

La Figura 2.17 indica la forma que se encuentran ubicadas las estaciones cuando se tienen ambientes exteriores ya sea que cuenten o no con movilidad, este tipo de redes utilizan un modelo de propagación para exteriores que permite obtener un modelo de canal que cumple con lo establecido para largas distancias y permite recolectar datos para predecir el comportamiento de la tecnología en este tipo de escenarios.

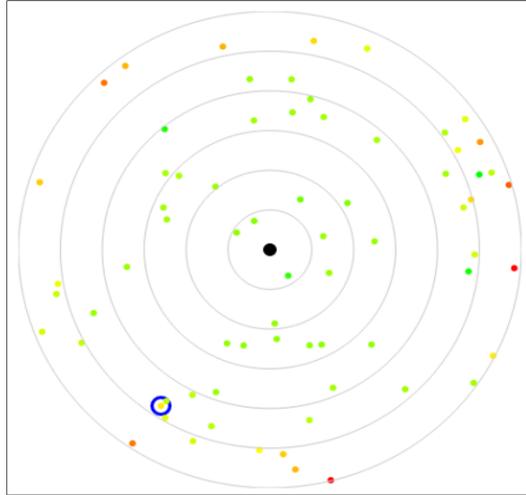


Figura 2.17 Distribución de estaciones escenario exterior (ahVizualizer)

IEEE 802.11ah soporta un gran número de estaciones y su diagrama (ahVizualizer) de distribución para ambientes exteriores se muestra en la Figura 2.18 en el cual dependiendo del soporte y las condiciones del AP lograrán una asociación exitosa.

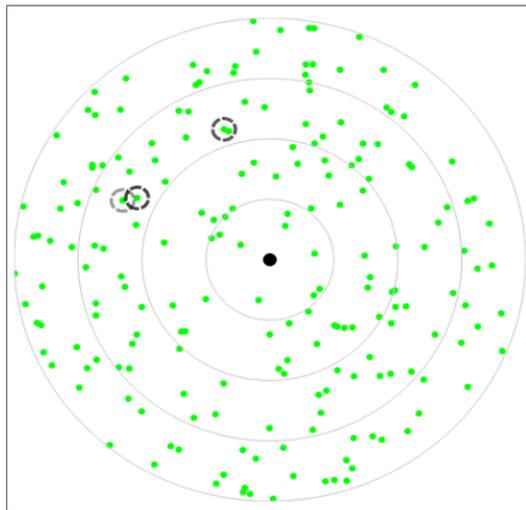


Figura 2.18 Distribución de estaciones escenario exterior denso (ahVizualizer)

2.4.2.1 Ejecución de escenarios

La ejecución del código principal se lo realiza colocando el comando `(./waf --run escenario#)` en el terminal de ubuntu, donde (#) es el número de escenario que se desea compilar. La Figura 2.19 muestra los resultados establecidos por la función principal del programa para el escenario 1. En el que se puede observar los valores de las métricas

planteadas para analizar el funcionamiento de la tecnología IEEE 802.11ah como son el rendimiento y el porcentaje de paquetes perdidos.

```
-----RESULTADOS ESCENARIO 1-----
Distancia maxima del las STA al AP [m] :      100
Numero total de estaciones :      50
Tamano del payload [bytes] :      240
Numero total de paquetes enviados :      311      paquetes
Numero total de paquetes entregados :      311      paquetes
Numero total de paquetes recibidos :      310      paquetes
Paquetes perdidos enlace ascendente [UL] :      0      paquetes
paquetes perdidos enlace descendente [DL] :      1      paquetes
Total paquetes perdidos :      1      paquetes
Velocidad de datos [Mbps] :      0.65
Throughput [Kbps] :      19.872
El porcentaje de paquetes perdidos es : 0.321543%
```

Figura 2.19 Resultados simulación escenario 1 (Ubuntu)

La figura 2.20 presenta los valores obtenidos para el escenario 2 en el cual se observa que el valor de la distancia cambia debido a que se tiene un escenario exterior, las medidas de análisis se adaptan al ambiente escogido.

```
-----RESULTADOS ESCENARIO 2-----
Distancia maxima del las STA al AP [m] :      600
Numero total de estaciones :      70
Tamano del payload [bytes] :      60
Numero total de paquetes enviados :      162      paquetes
Numero total de paquetes entregados :      117      paquetes
Numero total de paquetes que responden :      107      paquetes
Paquetes perdidos enlace ascendente [UL] :      45      paquetes
paquetes perdidos enlace descendente [DL] :      10      paquetes
Total paquetes perdidos :      55      paquetes
Velocidad de datos [Mbps] :      0.3
Throughput [Kbps] :      1.792
El porcentaje de paquetes perdidos es : 33.9506%
```

Figura 2.20 Resultados simulación escenario 2 (Ubuntu)

Para cuando se tiene un escenario con movilidad no se permite observar el movimiento en el diagrama de ahVizualizer por falta de compatibilidad con la clase del movimiento, por lo que se procede a imprimir en el terminal el cambio de posición de una estación y que depende de la velocidad escogida, para este caso existe un cambio a una velocidad constante de 2 m/seg como se puede observar en la Figura 2.21

```

POS: x=190, y=0, z=0
At time 195.872s client=192.168.0.4 sent 60 bytes to 192.168.0.11 port 9
At time 195.876s server=192.168.0.11 received 60 bytes from 192.168.0.4 port 49153
At time 195.876s server=192.168.0.11 sent 60 bytes to 192.168.0.4 port 49153
POS: x=192, y=0, z=0
At time 196.003s client=192.168.0.4 received 60 bytes from 192.168.0.11 port 9
POS: x=194, y=0, z=0
POS: x=196, y=0, z=0
At time 198.672s client=192.168.0.8 sent 60 bytes to 192.168.0.11 port 9

```

Figura 2.21 Resultados cambio de posición y velocidad escenario 3 (Ubuntu)

En la Figura 2.22 se tiene la simulación del escenario que cuenta con movilidad en el cual existe un cambio de posición establecida desde - /+ el valor de la distancia máxima establecida.

```

-----RESULTADOS ESCENARIO 3-----
Distancia maxima del las STA al AP [m] :      -200      a      200
Numero total de estaciones :      50
Tamano del payload [bytes] :      60
Numero total de paquetes enviados :      989      paquetes
Numero total de paquetes entregados :      989      paquetes
Numero total de paquetes que responden :      988      paquetes
Paquetes perdidos enlace ascendente [UL] :      0      paquetes
Paquetes perdidos enlace descendente [DL] :      1      paquetes
Total paquetes perdidos :      1      paquetes
Velocidad de datos [Mbps] :      0.3
Throughput [Kbps] :      4.84163
El porcentaje de paquetes perdidos es : 0.101112%

```

Figura 2.22 Resultados simulación escenario 3 (Ubuntu)

Cuando en un escenario las estaciones no logran una asociación con el AP producidos por valores fuera del rango soportado por la tecnología IEEE 802.11ah, se tiene un rendimiento con un valor de cero y los paquetes perdidos son considerados del 100% porque en este caso no se intercambian, lo que se muestra en la Figura 2.23, donde se puede observar que en este caso se establece una distancia en el cual no se logra intercambiar paquetes para el escenario 3.

```

-----RESULTADOS ESCENARIO 3-----
Distancia maxima del las STA al AP [m] :      700
Numero total de estaciones :      10
Numero total de paquetes enviados :      0      paquetes
Numero total de paquetes entregados :      0      paquetes
Numero total de paquetes que responden :      0      paquetes
Paquetes perdidos enlace ascendente [UL] :      0      paquetes
paquetes perdidos enlace descendente [DL] :      0      paquetes
Total paquetes perdidos :      0      paquetes
Velocidad de datos [Mbps] :      0.3
Throughput [Kbps] :      0
El porcentaje de paquetes perdidos es : -nan%

```

Figura 2.23 Resultados de no asociación de las STA/AP (Ubuntu)

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presenta un análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones utilizando el módulo modificado de IEEE 802.11ah, como también se incluyen las conclusiones y recomendaciones finales del trabajo.

3.1 RESULTADOS

Para comprender y analizar el comportamiento de la tecnología IEEE 802.11ah en redes densas para aplicaciones de sistemas IoT se realiza una recolección de datos basada en reiteradas simulaciones, variando algunos parámetros principales mientras otros se mantienen con valores constantes, los mismos que son preconfigurados antes de que se realice cada ejecución.

Las métricas escogidas para evaluar el desempeño de la tecnología IEEE 802.11ah como se había mencionado para cada escenario propuesto es el rendimiento (*throughput*) y el porcentaje total de paquetes perdidos, considerando que a porcentajes de pérdidas mayores al 15% son inaceptables.

3.1.1 ANÁLISIS ESCENARIO 1

Los resultados para un escenario interior que utiliza una velocidad de datos de 650 Kbps con un ancho de banda del canal de 2 MHz y 2 conjuntos de parámetros RAW (RPS), se presentan a continuación.

El primer parámetro que varía para observar una tendencia de las métricas planteadas es el número de estaciones que se conectan al AP, los resultados se presentan en la tabla 3.1 en el que se relaciona directamente con el porcentaje de paquetes perdidos, estos valores se obtienen considerando como parámetros fijos el esquema de codificación y modulación MCS0_2 a 650 Kbps, el rango de la distancia máxima para la distribución aleatoria de las estaciones y el tamaño de la carga útil.

Se propone variar el número de estaciones debido a que permite determinar el comportamiento de una red cuando se tiene gran cantidad de dispositivos que sería el caso de estudio para sistemas IoT.

Tabla 3.1 Resultados variación del número de estaciones escenario 1

MSC2_0: 650 Kbps, payload = 60bytes, d = 100m	
NÚMERO DE ESTACIONES	PAQUETES PERDIDOS [%]
50	0
60	0
70	0.230947
80	0.25202
90	1.26812
100	1.654664
150	8.09628
200	17.9276
250	72.2334
300	95.7872
350	96.2458
400	97.8476
450	99.7872
500	99.7872

El porcentaje de números de paquetes perdidos cuando se produce una variación del número de estaciones se puede observar en la Figura 3.1, en la cual se puede observar que mientras mayor sea el número de estaciones que se encuentran conectadas al AP utilizando la tecnología IEEE 802.11ah mayor será dicho porcentaje. Para este escenario con 150 estaciones se tiene un porcentaje aceptable, mientras que para un número mayor a esta cantidad la comunicación sería deficiente, aunque logren una asociación.

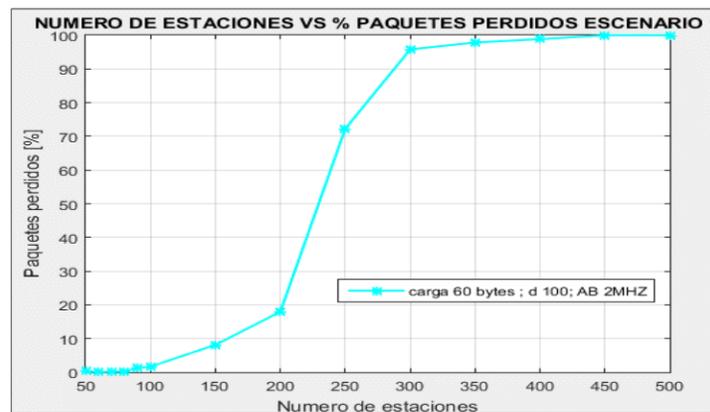


Figura 3.1 Número de estaciones vs % Paquetes perdidos escenario 1

Otro de los parámetros escogidos para el análisis es la distancia máxima a la que se encuentran distribuidas aleatoriamente las estaciones respecto al AP, los valores obtenidos se pueden ver se en la tabla 3.2, para este escenario se varía la ubicación aleatoria de las estaciones de 10 a 160 metros con el fin de observar el rango de

cobertura para un escenario interior se consideran como parámetros fijos el MCS a 650 Kbps, el número de estaciones y la cantidad de carga útil.

Tabla 3.2 Resultados variación de la distancia entre STA/AP escenario 1

MCS2_0: 650 Kbps, 100 estaciones, 60 bytes		
MÁXIMA DISTANCIA STA/AP [m]	RENDIMIENTO [Kbps]	PAQUETES PERDIDOS [%]
10	9.796	1.060780
20	9.728	1.236250
30	9.736	1.143790
40	9.688	1.800330
50	9.624	1.812190
60	9.704	1.964230
70	9.680	1.610110
80	9.786	1.785710
90	9.800	1.779940
100	9.744	1.654664
120	9.808	1.296600
140	7.608	15.33980
160	No se asocian	100

En la Figura 3.2 se presenta el comportamiento del rendimiento [Kbps] en función de la distancia máxima, en el que se puede observar que, bajo las condiciones establecidas en ambientes interiores, la cobertura máxima con un rendimiento que se mantiene en un rango de 9.5 a 10 Kbps es de 120 metros, por lo cual en ambientes exteriores este modelado no tendría un funcionamiento adecuado. Los valores de rendimiento y porcentajes de paquetes perdidos no siguen un patrón establecido debido a la naturaleza y funcionamiento de la tecnología IEEE 802.11ah como también a la forma aleatoria de ubicación de las estaciones.

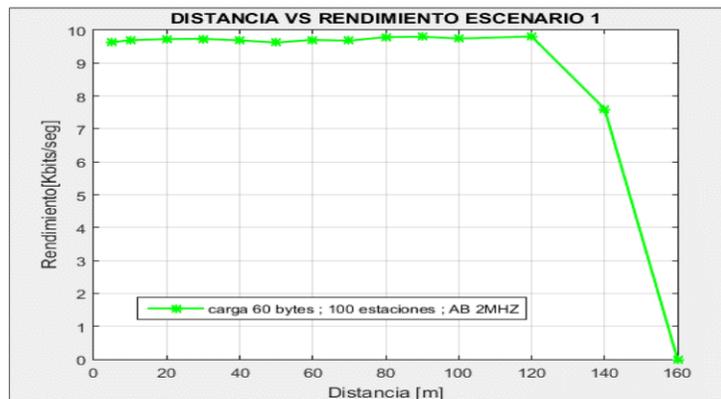


Figura 3.2 Distancia vs Rendimiento escenario 1

El porcentaje de paquetes perdidos para las variaciones en el rango de 10 a 100 metros es relativamente bajo, lo cual indica que la tecnología funciona de una manera estable en el escenario propuesto y se puede observar en la Figura 3.3, pasado este rango las perdidas comienzan a aumentar.

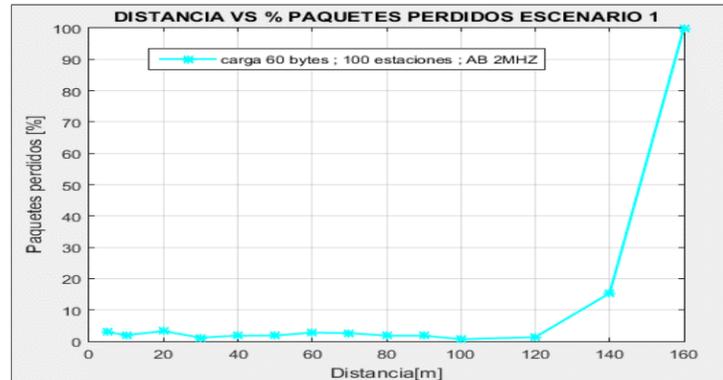


Figura 3.3 Distancia vs % Paquetes perdidos escenario 1

Un tercer parámetro escogido para el análisis es el cambio de la longitud de la carga útil, manteniendo constantes parámetros como el MCS a 650 Kbps, la distancia y el número de estaciones, la variación de este parámetro ayuda a tener una idea del tipo de aplicaciones que se pueden tener en IEEE 802.11ah, los valores se tienen en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Resultados variación de la carga útil escenario 1

MCS2_0: 650 Kbps , d = 100 m, 100 estaciones.		
LONGITUD DE LA CARGA [bytes]	RENDIMIENTO [Kbps]	PAQUETES PERDIDOS [%]
60	9.744	0.654664
64	10.3936	0.654664
96	15.5648	0.981997
128	20.6845	1.136600
192	31.1040	1.145660
256	41.5061	0.981997
384	62.3616	0.981997
448	72.8149	0.981997
512	83.0130	0.981997
640	103.168	2.12766
768	124.211	2.47300
896	143.599	2.61866
1024	163.157	3.27332
1280	205.824	4.41899
1536	236.749	10.8020
1792	252.314	27.3322
1920	233.472	50.5728

En la Figura 3.4 se muestra el comportamiento del rendimiento en función del cambio de la longitud de carga útil, se puede observar que existe un aumento considerable en el rendimiento a medida que la carga útil aumenta hasta llegar al límite de su capacidad donde se comienza a notar una disminución a los 1792 bytes el cual se sería el límite de carga útil que puede llevar la trama en este escenario.

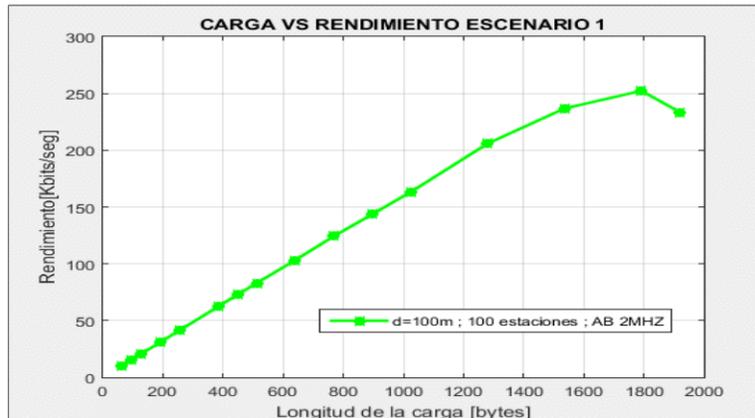


Figura 3.4 Carga útil vs Rendimiento escenario 1

Para el análisis del porcentaje de paquetes perdidos en función de la carga útil se observa que a medida que aumenta el tamaño de datos los paquetes perdidos aumentan, este comportamiento se encuentra expresado gráficamente en la Figura 3.5

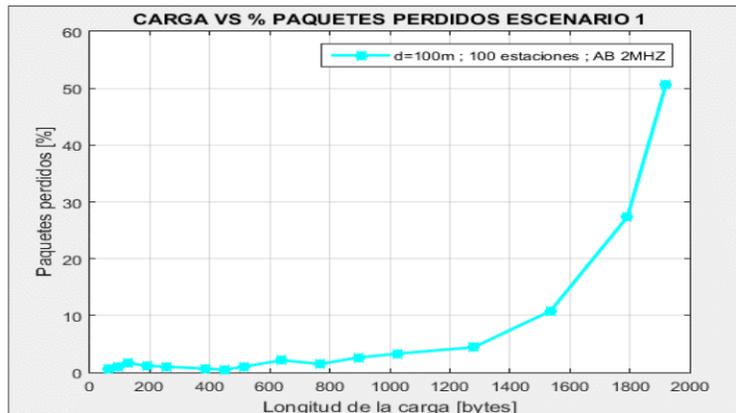


Figura 3.5 Carga útil vs % Paquetes perdidos escenario 1

Tras analizar las gráficas, se puede afirmar que el porcentaje de paquetes perdidos se mantiene con un rendimiento dentro de un nivel adecuado hasta los 1536 Bytes de longitud de la carga útil. A pesar de que las estaciones se asocian aumentando el rendimiento hasta una carga de 1792 bytes el porcentaje de paquetes perdidos no es aceptable en estos valores.

3.1.2 ANÁLISIS ESCENARIO 2

El escenario 2 propuesto permite comprender el comportamiento de IEEE 802.11ah cuando existe una asociación y comunicación de las estaciones en un ambiente exterior, con una distancia mayor respecto a la del primer escenario, una velocidad de datos de 300 Kbps utilizando un esquema de modulación y codificación MSC0_1 con ancho de banda de 1 MHz y con diferente modelo de pérdidas de propagación establecidas para cada escenario.

En la tabla 3.4 se tiene los valores del porcentaje de paquetes perdidos conforme varía el número de estaciones a una carga útil y distancia establecida.

Tabla 3.4 Resultados variación del número de estaciones escenario 2

MSC1_0: 300Kbps, payload = 60 bytes, d = 400 m.	
NÚMERO DE ESTACIONES	PAQUETES PERDIDOS [%]
10	0
20	0
30	0
40	0.39842
50	0.21221
60	0.51210
70	0.92378
80	1.22449
90	1.89766
100	2.43506
150	8.19491
200	13.4794
250	44.5974
300	82.8775
350	99.4353
400	98.1430
450	99.980
500	99.7114

De forma gráfica este comportamiento se presenta en la Figura 3.6, donde se puede observar para este escenario planteado la cantidad de dispositivos que se pueden tener es de 200 estaciones, luego de este valor los porcentajes de paquetes perdidos aumenta considerablemente produciendo pérdidas inaceptables para la comunicación con el AP.



Figura 3.6 Número de estaciones vs % Paquetes perdidos escenario 2

La tabla 3.5 contiene los valores de rendimiento y porcentaje de paquetes perdidos cuando cambia la distancia entre STA/AP, considerando que en un ambiente exterior las distancias establecidas van desde los 100 m hacia delante con el fin establecer un límite y observar si hay una asociación e intercambio de datos a distancias superiores, se mantendrá fijos parámetros como MCS, número de estaciones y longitud de la carga.

El rendimiento en función de la distancia a la cual se encuentran ubicadas las estaciones se puede observar en la Figura 3.7, en la cual se tiene que para valores de distancia en el rango comprendido entre 550 y 660 metros se tiene una disminución de rendimiento lo que indica que el rendimiento será aceptable para valores menores a este rango y no utilizable para rangos superiores.

Tabla 3.5 Resultados variación de la distancia entre STA/AP escenario 2

MCS1_0 : 300 kbps; 70 estaciones, 60 bytes		
MÁXIMA DISTANCIA STA/AP [m]	RENDIMIENTO [Kbps]	PAQUETES PERDIDOS [%]
100	6.848	0.46620
150	6.872	0.69605
200	6.848	0.46620
250	6.872	0.69605
300	6.904	0.83148
400	6.896	0.92378
450	6.864	1.84758
500	6.752	1.87793
550	6.808	1.96822
600	2.128	15.4839
650	No se asocian	100
700	No se asocian	100

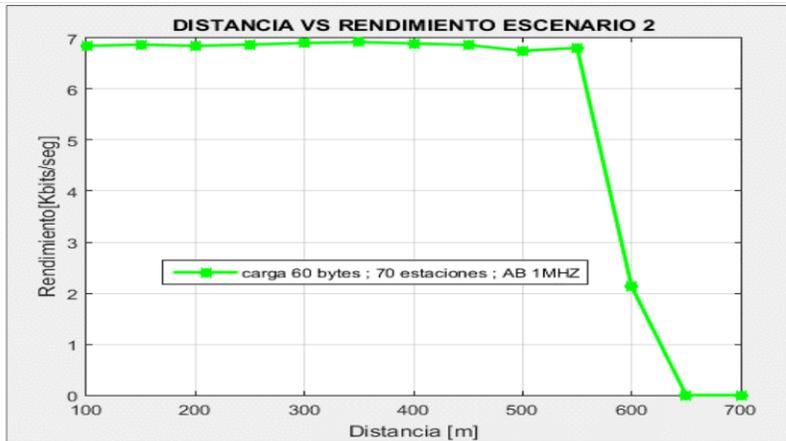


Figura 3.7 Distancia vs Rendimiento escenario 2

Cuando se quiere observar el porcentaje de paquetes que se pierden en función de la distancia para escenarios exteriores se presenta la Figura 3.8 donde a partir de una distancia mayor a 600 metros las pérdidas de paquetes son considerables y no se logra ningún tipo de asociación entre STA y el AP produciéndose una pérdida total de los paquetes.

En escenarios exteriores también se puede tener diferentes tipos de tamaño de la carga útil dependiendo de la aplicación que se requiera, estos valores se pueden ver en la Tabla 3.6. Para este caso se mantiene una distancia fija al igual que el número de estaciones.

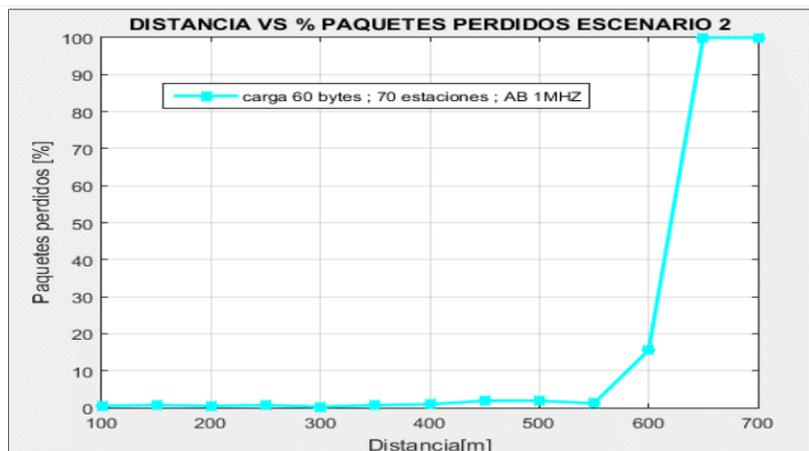


Figura 3.8 Distancia vs % Paquetes perdidos escenario 2

Tabla 3.6 Resultados variación de la carga útil escenario 2

MCS1_0: 300 Kbps , AB = 1 MHz, d = 400 m, 70 estaciones		
LONGITUD DE LA CARGA [bytes]	RENDIMIENTO [Kbps]	PAQUETES PERDIDOS [%]
60	6.896	0.923788
64	9.20	0.692841
96	11.0336	0.923788
128	14.7115	0.923788
192	22.0928	0.692841
256	29.4571	0.682841
384	44.0832	0.923788
448	61.0123	2.540420
512	68.2315	2.309470
640	72.192	4.15704
768	84.3776	9.468820
896	91.3920	22.1709
960	70.14	59.1224

La Figura 3.9 muestra el rendimiento cuando varía la longitud de la carga útil, para este caso se observa que mientras aumenta la carga el valor del rendimiento también aumenta hasta cuando se llega al límite de 768 bytes donde comienza a disminuir hasta el punto donde no se puede asociar con su respectivo AP.

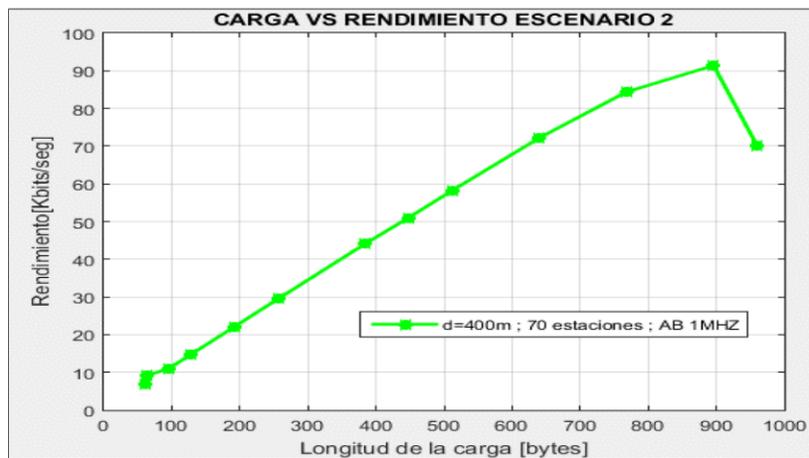


Figura 3.9 Carga útil vs Rendimiento escenario 2

La variación del porcentaje de paquetes perdidos aumenta a medida que la carga útil también aumenta esto se puede ver en la Figura 3.10 donde los paquetes perdidos para una carga de 768 bytes se consideran alta y para valores mayores a ésta se perdería la calidad de la comunicación.

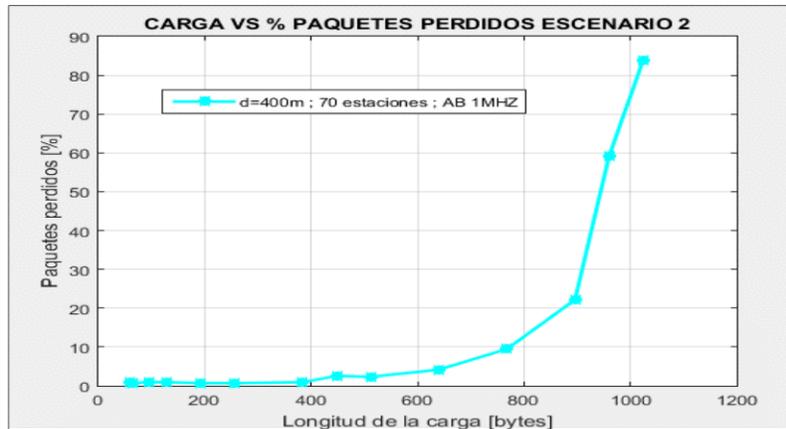


Figura 3.10 Carga útil vs % Paquetes perdidos escenario 2

3.1.3 ANÁLISIS ESCENARIO 3

El escenario 3 considera estaciones móviles para ambientes exteriores, el estudio de este escenario permite observar algunos valores presentados en la Tabla 3.7 y el efecto que tienen una estación moviéndose a una velocidad constante de 2 m/seg respecto a una posición fija del AP, manteniendo también constante el esquema de modulación MSC0_1 que implica una velocidad de 300 Kbps con un ancho de banda del canal de 1 MHz, y una distancia de 400m.

Tabla 3.7 Resultados variación del número de estaciones escenario 3

MSC1_0 – 300 Kbps, AB 1 MHz, payload=60bytes, d=400m, velocidad=2m/seg	
NÚMERO DE ESTACIONES	PAQUETES PERDIDOS [%]
20	0
30	0
40	0
50	0.101112
60	0.101112
70	0.216820
80	0.443599
90	0.846024
100	1.065450
150	2.751360
200	10.71790
250	33.9503
300	74.9566
350	100
400	100

El cambio del porcentaje de paquetes perdidos cuando se incrementa el número de estaciones con las condiciones de análisis establecidas para el escenario 3 se tiene en la Figura 3.11. Se puede observar que el porcentaje de pérdidas de paquetes considerables se tiene luego de las 200 estaciones e incluso cuando existen más de 350 estaciones no se logra una asociación con el AP para intercambiar paquetes por lo que se consideran que todos se pierden.

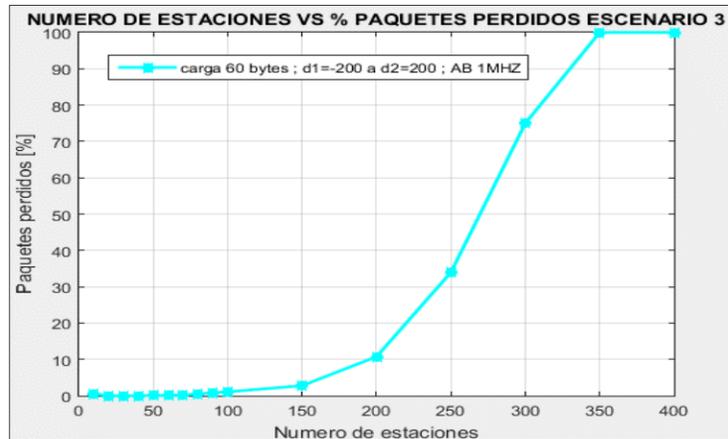


Figura 3.11 Número de estaciones vs % Paquetes perdidos escenario 3

Los porcentajes de paquetes perdidos del escenario con movilidad en comparación con el escenario exterior que mantiene sus estaciones estáticas varían en pequeñas cantidades debido al efecto mismo del movimiento, pero no cambia su comportamiento, mientras que la cantidad de dispositivos máximos que logran asociarse es de 300 sin considerar si se encuentran con un porcentaje de paquetes perdidos aceptable en comparación a los 500 del escenario 2.

En la tabla 3.8 se presentan los resultados cuando se tiene un aumento de la longitud de la carga útil para observar las mismas métricas establecidas manteniendo fijos parámetros como la velocidad de movimiento, el número de estaciones y la distancia recorrida.

Tabla 3.8 Resultados variación de la carga útil escenario 3

MCS1_0: 300 Kbps, AB = 1MHz, d = 400, 70 estaciones, velocidad = 2m/seg		
LONGITUD DE LA CARGA [bytes]	RENDIMIENTO [Kbps]	PAQUETES PERDIDOS [%]
60	6.87665	0.216820
64	7.22286	0.272306
96	10.8069	0.278453
128	14.4300	0.289226
192	21.6451	0.289226
256	28.881	0.344613
384	43.2744	0.361533
448	50.560	0.389226
512	57.7829	0.578453
640	72.4898	0.644613
768	74.3776	9.468820
896	81.3189	27.25960
1024	86.1832	63.62980
1280	93.9268	92.6247

La representación de los valores obtenidos se puede observar en la Figura 3.12 donde se ve la tendencia que tiene el rendimiento en función de la variación de la carga útil donde el rango considerado aceptable es entre 60 a 768 bytes, luego de esto se tiene un aumento del rendimiento incluyendo una asociación de las estaciones con 1280 bytes pero con una calidad deficiente.

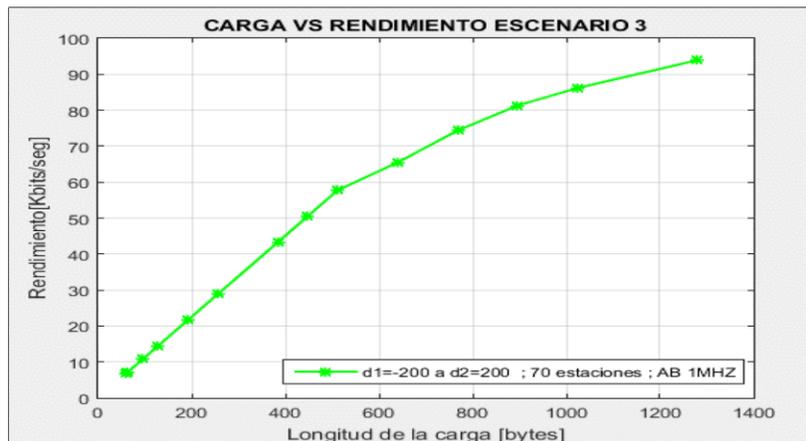


Figura 3.12. Carga útil vs Rendimiento escenario 3

Para una carga mayor a 768 bytes los valores de porcentaje de paquetes que se pierden se encuentran altos por lo que se podría afirmar que no habrá buena calidad en la red para estos casos, este comportamiento se puede observar en la Figura 3.13 donde las pérdidas aumentan a medida que aumenta la carga útil.

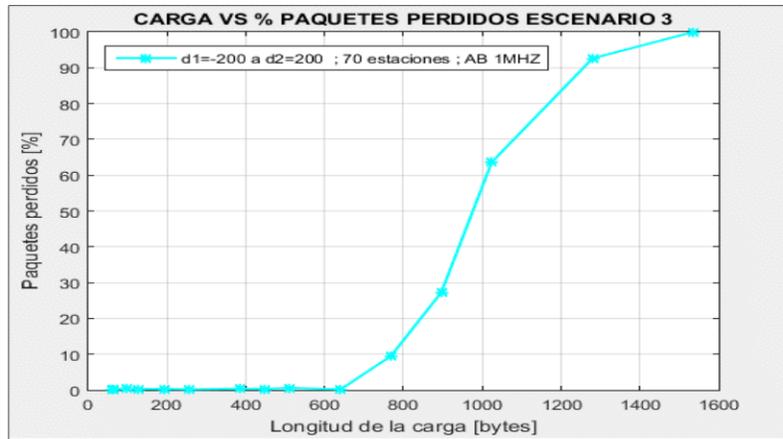


Figura 3.13 Carga útil vs % Paquetes perdidos escenario 3

Los porcentajes de paquetes perdidos y valores de rendimiento disminuyen igualmente en valores pequeños en comparación con escenarios estáticos.

Un parámetro que se tiene en escenarios con movilidad el cual ayuda a observar cual sería el comportamiento de la red en términos de rendimiento y porcentaje de paquetes perdidos es la velocidad con la que se mueven algunas estaciones respecto a la posición del AP, esta velocidad es constante en todo un intervalo de tiempo, los valores se encuentran en la Tabla 3.9 cuando se tiene establecido como parámetros constante el tamaño del payload 60 bytes, una distancia recorrida total de 400 metros y 70 estaciones que compiten por establecer una conexión.

Tabla 3.9 Resultados variación de la velocidad escenario 3

MCS1_0: 300 Kbps, AB = 1MHz, d = 400, 70 estaciones, 60 bytes		
Velocidad [m/seg]	Rendimiento [Kbps]	Paquetes perdidos[%]
1	6.8776	0.179662
2	6.8766	0.216820
3	6.8764	0.434311
4	6.8751	0.439239
5	6.8746	0.368324
10	6.8620	0.696056
15	6.8560	0.928074
20	6.8400	1.160090
25	6.8320	1.160090
30	6.8240	1.160090
35	6.8240	1.160090
40	6.8080	1.392110
45	6.6880	3.504670

El rendimiento presenta una disminución cuando una estación se mueve con mayor velocidad debido a efectos propios de las tecnologías inalámbricas, pero se mantiene en un rendimiento aceptable, el rango de velocidades es de 1 a 45 m/seg considerando que se tienen diferentes tipos de aplicaciones. Este comportamiento se puede observar en la Figura 3.14.

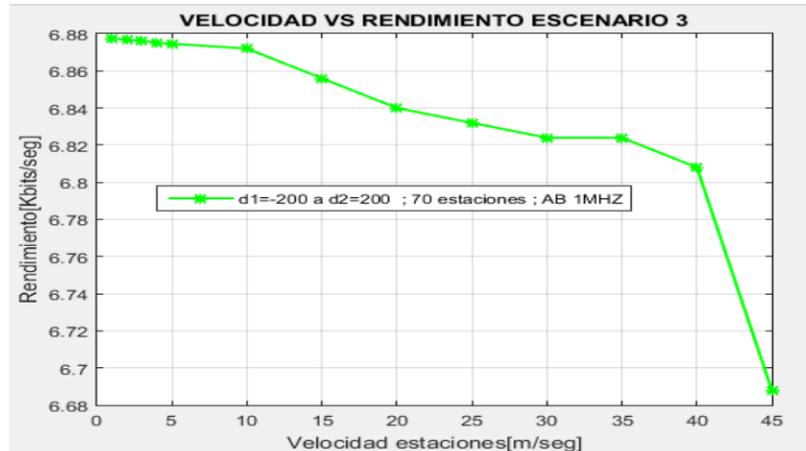


Figura 3.14 Carga útil vs velocidad de las estaciones escenario 3

En la Figura 3.15 se puede observar que el porcentaje de paquetes perdidos tiende a aumentar a medida que aumenta la velocidad con la que se mueven las estaciones, teniendo en cuenta que los valores para porcentaje de pérdidas son bajos, no existiría una desconexión de las estaciones, por lo que la tecnología IEEE 802.11ah funciona para estaciones móviles bajo las condiciones dadas.

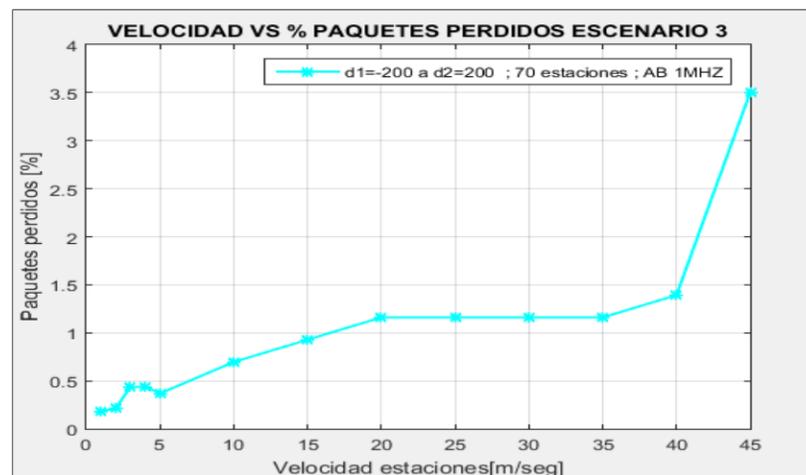


Figura 3.15 Carga útil vs velocidad de las estaciones escenario 3.

3.2 CONCLUSIONES

- Tras un análisis de resultados se concluye que la tecnología IEEE 802.11ah logra establecer la comunicación entre una gran cantidad de dispositivos conectado a un mismo AP, como también cubre rangos de cobertura con distancias extensas, conservando la calidad de la comunicación tanto en rendimiento como en porcentajes de paquetes perdidos.
- Mediante el análisis IEEE 802.11ah los nuevos mecanismos de mejoras implementados para cumplir con los requerimientos de redes densas para sistemas IoT permite que todas las estaciones se asocien a su debido tiempo, estas mejoras funcionan en base a tecnologías inalámbricas existentes lo que permite que puedan coexistir en términos de compatibilidad y funcionamiento.
- Se puede identificar mediante el análisis de las simulaciones que IEEE 802.11ah tiene porcentajes de pérdidas pequeños para tamaños de carga útil baja, siendo este un parámetro importante para observar los campos de aplicaciones de los diferentes ambientes interiores o exteriores, ideal para dispositivos de control y monitoreo con bajo consumo energético.
- En las mediciones obtenidas mediante la simulación se concluye que en un ambiente interior (indoor) IEEE 802.11ah tiene un comportamiento adecuado en todo el rango de cobertura establecido de 100 metros, mientras que para ambientes exteriores se observa una asociación e intercambio de datos de las estaciones con su respectivo AP a una distancia máxima de hasta 600 metros.
- Mediante la simulación de los escenarios propuestos y la recolección de datos se identifica que cuando se tiene un escenario exterior con estaciones fijas, el rendimiento de la red es mayor respecto a cuando se trabaja con estaciones móviles, producto de que existe un menor tiempo empleado para la asociación con el AP.

3.3 RECOMENDACIONES

- Debido a la distribución aleatoria de las estaciones se debe considerar que esto altera los valores de rendimiento y porcentaje de paquetes perdidos obtenidos. Se recomienda probar los escenarios de simulación controlando la distancia a la que se encuentran las estaciones.
- Tener en cuenta la distribución de las estaciones en cada conjunto de parámetros de acceso de ventana restringida (RPS), puesto que influirá en la cantidad de dispositivos que el AP permitirá que accedan al canal y establecer una comunicación, por lo que se recomienda controlar este parámetro cuando se requiere un soporte a mayores dispositivos con diferentes tipos de aplicación.
- Como trabajo futuro se puede considerar el análisis de otras métricas como puede ser el valor total de la interferencia y el consumo total de energía del sistema variando diferentes parámetros que no fueron tomados en cuenta en este trabajo, como por ejemplo el esquema de codificación y modulación (MCS), con el fin de seguir observando el comportamiento del módulo aplicado a la tecnología IEEE 802.11ah en ns-3.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Tian, S. Deronne, S. Latré y J. Famaey, Implementation and validation of an IEEE 802.11ah module for NS-3, Nokia, 2016.
- [2] A. Stefan, V. R y G. Ignas, Advances in wireless M2M and IoT: Rapid SDR-prototyping of IEEE 802.11 ah, 2014.
- [3] H. Wang y O. ., Fapojuwo, «A Survey of Enabling Technologies of Low Power and Long Range Machine-to-Machine Communications,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, nº 4, pp. 2621-2639, 2017.
- [4] M. Bhayani, M. Patel y C. Bhatt, «Internet of Things (IoT): In a way of smart world,» de *Proceedings of the international congress on information and communication technology*, Singapore, 2016, pp. 343-350.
- [5] A. Stefan, V. R y G. Ignas, «IEEE 802.11 ah: Advantages in standards and further challenges for sub 1 GHz Wi-Fi.,» de *IEEE international conference on communications (ICC)*, 2012.
- [6] IOT ANALYTICS , «IOT ANALYTICS MARKET INSIGHTS FOR THE INTERNET OF THINGS,» [En línea]. Available: <https://iot-analytics.com/iot-market-data/global-iot-enterprise-spending/>. [Último acceso: 4 Diciembre 2021].
- [7] B. S. Pavan, M. Mahesh y V. P. Harigovindan, «Performance anomaly of Group-Synchronized Distributed Coordination Function in IEEE 802.11ah based Multi-rate IoT Networks,» *International Conference on Computing, Communication and Security (ICCCS)*, vol. v, pp. 1-5, 2020.
- [8] L. J. C. Araiza, Evaluation of IEEE 802.11ah Technology for Wireless Sensor Network, Tampere, 2015.
- [9] J. Berg, The IEEE 802.11 Standardization, its History, Specifications, Implementations and Future, Vermont.
- [10] C. Tena, Cómo conocer el uso actual de las redes WLAN basadas en IEEE 802.11, Cataluña, 2013.
- [11] P. Minyoung, «Specification Framework for TGah: IEEE 802 LAN/MAN,» 15 Mayo 2013. [En línea]. Available: http://www.ieee802.org/11/Reports/tgah_update.htm. [Último acceso: 01 Diciembre 2021].
- [12] W. Sun, C. Munhwan y C. Sunghyun, «IEEE 802.11ah: A Long Range 802.11 WLAN at Sub 1 GHz.,» *J. ICT Stand*, vol. 1, pp. 83-108, 2013.
- [13] B. Domazetović, E. Kočan y A. Mihovska, «Performance evaluation of IEEE 802.11ah systems,»

2016 24th Telecommunications Forum (TELFOR), pp. 1-4, 2016.

- [14] G. Baños, A. Shahwaiz, A. Lopez y V. E. Garcia, «Throughput and Range Characterization of IEEE 802.11ah,» *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, nº 9, pp. 1621-1628, 2017.
- [15] M. Obaidat, «A Survey on Enabling Wireless Local Area Network Technologies for Smart Cities,» de *Smart Cities and Homes: Key Enabling Technologies* , Petersburg, Yevgeni Koucheryavy, pp. 91-110.
- [16] M. Park, «IEEE 802.11ah: sub-1-GHz license-exempt operation for the internet of things,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, nº 9, pp. 145-151, 2015.
- [17] T. Le, A. Seferagic, S. Santi, J. Famaey y E. De Poorter, «Extension of the IEEE 802.11ah ns-3 simulation module,» *10th Workshop on ns-3 (WNS3 '18)*, vol. 1, pp. 53-60, 2018.
- [18] nsnam.org, «ns-3 (NETWORK SIMULATOR),» 01 Octubre 2021. [En línea]. Available: <https://www.nsnam.org/docs/release/3.35/tutorial/ns-3-tutorial.pdf>. [Último acceso: 16 Noviembre 2021].
- [19] D. Bankov, E. Khorov, A. Lyakhov, E. Stepanova, L. Tian y J. Famaey, What Is the Fastest Way to Connect Stations to a Wi-Fi HaLow Network?, Moscú, 2018.
- [20] F. A. García, A. J. Pina y P. E. Leyva, «ESTADO DEL ARTE DE LAS REDES INALÁMBRICAS,» *Ingeniería Industrial*, vol. XXVIII, nº 3, pp. 50-56, 2007.
- [21] G. R. Hiertz, D. Denteneer, L. Stibor, Y. Zang, C. Pérez y B. Walke, «The IEEE 802.11 Universe,» de *IEEE STANDARDS IN COMMUNICATIONS AND NETWORKING*, 2010, pp. 62-70.

5 ANEXOS

Los anexos necesarios para complementar el trabajo se presentan a continuación:

ANEXO I: INSTALACIÓN DEL MÓDULO IEEE 802.11AH EN NS-3

ANEXO II: FORMATO DE LA CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS RAW

ANEXO III: ENLACE PARA CÓDIGOS DE SIMULACIÓN

ANEXO I. INSTALACIÓN DEL MÓDULO IEEE 802.11AH EN NS-3

Para la instalación y configuración del módulo IEEE 802.11ah en Ubuntu se deben instalar algunas dependencias antes, como se había mencionado el módulo IEEE 802.11ah viene empaquetado en NS3-2.23.

```
sudo apt-get update
sudo apt-get -y install gcc g++ python
sudo apt-get -y install gcc g++ python python-dev
sudo apt-get -y install qt4-dev-tools libqt4-dev
sudo apt-get -y install mercurial
sudo apt-get -y install bzip2
sudo apt-get -y install cmake libc6-dev libc6-dev-i386 g++-multilib
sudo apt-get -y install gdb valgrind
sudo apt-get -y install gsl-bin libgsl2 libgsl2:i386
sudo apt-get -y install flex bison libfl-dev
sudo apt-get -y install tcpdump
sudo apt-get -y install sqlite sqlite3 libsqlite3-dev
sudo apt-get -y install libxml2 libxml2-dev
sudo apt-get -y install libgtk2.0-0 libgtk2.0-dev
sudo apt-get -y install vtun lxc
sudo apt -y install git
git clone https://github.com/imec-idlab/IEEE-802.11ah-ns-3.git
```

Para la compilación se introducen los siguientes comandos.

```
cd IEEE-802.11ah-ns-3
CXXFLAGS="-std=c++11" ./waf configure --disable-examples --disable-tests
./waf
./waf --run test
```

Para instalar y observar las simulaciones en la herramienta (ahVisualizer) en el navegador se debe ingresar a escuchar el puerto configurado localhost:8080.

```
git clone https://github.com/imec-idlab/ahVisualizer.git
apt-get -y install npm
cd ahVisualizer
nodejs index.js
```

ANEXO II. FORMATO DE LA CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS RAW

Configuración de los dos parámetros del acceso de ventana restringida (RAW) presentes en la ruta Home/IEEE-802.11ah-ns-3/OptimalRawGroup/RawConfig-test-escenario#

2	-----						
1	-----						
0	1	1	200	2	0	1	35

1	-----						
0	1	1	200	2	0	36	70

ANEXO III. ENLACE PARA CÓDIGOS DE SIMULACIÓN

El código de los diferentes escenarios se puede encontrar en:

https://epnecuador-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/eric_chinchin_epn_edu_ec/Evle1JISfQZDimykh24ctsQBxCwea0M5GWboGCwQ6VKLfw?e=IMvDEh