



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA ELÉCTRICA – TELECOMUNICACIONES**

**ESTUDIO DE LA CALIDAD DE SERVICIO EN REDES WIFI IEEE 802.11AH**

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**  
**JUAN JOSÉ MARCIAL GONZÁLEZ**

**TUTOR PRINCIPAL**  
**DR. JAVIER GÓMEZ CASTELLANOS**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. SEPTIEMBRE DE 2022**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Víctor Rangel Licea

Secretario: Dr. Luis Francisco García Jiménez

1 er. Vocal: Dr. Javier Gómez Castellanos

2 do. Vocal: Dr. Luis Orozco Barbosa

3 er. Vocal: Dr. José Jaime Camacho Escoto

La tesis se realizó en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México

**TUTOR DE TESIS:**

**Dr. Javier Gómez Castellanos**

---

**FIRMA**

# Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Posgrado en Ingeniería eléctrica por darme la gran oportunidad de superarme académica y profesionalmente. También agradezco por poner en mi camino a los mejores profesores.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la ayuda otorgada para realizar el presente trabajo de Maestría.

A mi tutor el Dr. Javier Gómez Castellanos por haber confiado en mí, haberme dado la oportunidad de trabajar con él y darme la guía para el desarrollo de esta tesis.

A mis padres, Micaela y José por apoyarme y siempre estar a mi lado. Muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este.

Agradecimiento al Proyecto PAPIIT-**IN119820** “Diseño y prueba de métodos que incrementen el reuso espacial de redes inalámbricas”

# Índice general

Agradecimientos .....	I
Índice general.....	II
Índice de tablas .....	IV
Índice de figuras.....	V
Lista de acrónimos .....	VI
Capítulo 1 Introducción .....	1
1.1. Definición del problema .....	2
1.1.1. Metas generales.....	3
1.1.2. Metas específicas.....	3
1.1.3. Metodología .....	3
1.2. Estructura de la tesis .....	3
Capítulo 2 Marco teórico y Estado del Arte .....	5
2.1. CSMA .....	5
2.2. Problema del nodo oculto .....	6
2.2.1. RTS/CTS.....	7
2.2.2. DCF.....	7
2.3. Wi-Fi 802.11 .....	8
2.4. Topología de red basada en el estándar 802.11 .....	9
2.5. Calidad de servicio y EDCA.....	10
2.6. Modelos de propagación en redes inalámbricas .....	12
2.3.1. Modelo de propagación en espacio libre. ....	13
2.3.2. Modelos <i>indoor</i> .....	13
2.7. Estado del arte.....	15
Capítulo 3 Estándar IEEE 802.11ah .....	17
3.1. Capa física.....	17
3.2. Atribución de frecuencias .....	17
3.3. Modos de transmisión .....	19
3.4. Capa MAC .....	20
3.5. Acceso al canal .....	20
Capítulo 4 experimentos .....	23
4.1 Simulador NS-3 .....	23

4.2. Módulo 802.11ah del simulador NS-3.....	23
4.3 Experimentos realizados .....	24
Experimento 1 .....	26
Experimento 2.....	29
Experimento 3.....	31
Experimento 4.....	35
Experimento 5.....	37
Experimento 6.....	39
4.4. Discusión de los experimentos.....	41
Capítulo 5 Conclusiones y trabajo a futuro.....	44
Bibliografía .....	45

# Índice de tablas

Tabla 1 Características de los estándares 802.11 [1].	1
Tabla 2 Clases de acceso para cada tipo de tráfico [15].	12
Tabla 3 Coeficientes de pérdida de potencia, $\gamma$ para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores [18].	15
Tabla 4 Factores de pérdida de penetración en el suelo, $L_f$ (dB) [18].	15
Tabla 5 S1G MSCs para 2 MHz, $N_{ss}=1$ [25].	19
Tabla 6 Experimentos realizados.	25
Tabla 7 Parámetros generales de simulación.	25
Tabla 8 Parámetros de simulación.	26
Tabla 9 Tráfico asignado a cada nodo.	26
Tabla 10 Parámetros de simulación experimento 2.	30
Tabla 11 Características de tráfico.	32
Tabla 12 Parámetros RAW y de simulación.	33
Tabla 13 Parámetros de simulación experimento 4.	35
Tabla 14 Distribución de nodos en los <i>slots</i> de un único RAW.	36
Tabla 15 Parámetros RAW y de simulación.	37
Tabla 16 Parámetros de simulación.	39
Tabla 17 Discusion de los experimentos.	43

# Índice de figuras

Figura 1 Comparación de IEEE 802.11ah con otras tecnologías [2].	2
Figura 2 El nodo B puede detectar a los nodos A y C, pero estos últimos no pueden detectarse entre ellos.	7
Figura 3 Ejemplo de transmisión con CSMA/CA [9].	8
Figura 4 Modelo OSI y Familia IEEE 802.11.	9
Figura 5 Infraestructura BSS.	9
Figura 6 Esquema básico del mecanismo EDCA [14].	11
Figura 7 Espectro asignado en EEUU [23].	18
Figura 8 Atribución de la banda de 902 a 928 MHz [24].	18
Figura 9 Espectros asignados a la operación de 802.11ah de cada país [23].	18
Figura 10 Estructura AID [23].	20
Figura 11 Esquema del mecanismo RAW [26].	21
Figura 12 Escenario 1.	26
Figura 13 Paquetes transmitidos y recibidos para los distintos tipos de tráfico.	28
Figura 14 Paquetes transmitidos y recibidos para los distintos tipos de tráfico.	29
Figura 15 Escenario experimento 2.	30
Figura 16 <i>Throughput</i> de la red al agrupar los nodos.	31
Figura 17 Paquetes transmitidos VS paquetes recibidos.	31
Figura 18 Escenario experimento 3.	32
Figura 19 Desempeño por tipo de tráfico.	34
Figura 20 Rx vs Tx por tipo de tráfico.	35
Figura 21 Escenario experimento 4.	36
Figura 22 <i>Throughput</i> .	37
Figura 23 Relación Rx/Tx.	37
Figura 24 Porcentaje de uso del canal a 100% de saturación.	38
Figura 25 Porcentaje de uso del canal a 100% de saturación.	38
Figura 26 Escenario 4.	39
Figura 27. Desempeño de la red por servicio.	40
Figura 28 Paquetes recibidos con éxito por servicio.	41



# Lista de acrónimos

IEEE: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.

LAN: Red de Área Local.

WLAN: Red de Área Local Inalámbrica.

PHY: Capa física.

MAC: Control de Acceso al Medio.

AP: Punto de Acceso.

Kbps: Kilobites por segundo.

Mbps: Megabites por segundo.

OFDM: Multiplexación por división de frecuencia ortogonal

MCS: Secuencia Espacial.

NSS: Número de flujos espaciales.

NDBPS: Numero de bits de datos por símbolo.

IG: Intervalo de guarda.

AID: Identificador único.

TIM: Identificador de tráfico.

EDCA: Canal de acceso distribuido mejorado.

RAW: Ventana de acceso restringido.

IFT: Instituto Federal de telecomunicaciones

CNAF: Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias

QoS: Calidad de servicio.

ACK: Acuse de recibo.

RTS: *Request to send.*

CTS: *Clear to send.*

SIFS: Espacio corto entre tramas

CSB: *Cross slot boundary*

SDC: *Slot duration count*

RSN: *RAW slot number*

SF: *Slot format*

# Capítulo 1 Introducción

Las comunicaciones inalámbricas surgieron de la necesidad de transmitir y recibir información a largas distancias sin necesidad de un medio de propagación guiado, por lo que las ondas radioeléctricas se convirtieron en el medio ideal para realizar esta tarea. Los primeros sistemas de comunicaciones inalámbricas o radiocomunicaciones se remontan a los sistemas de radiotelegrafía desarrollados entre los años de 1886 y 1902. Más adelante, con la evolución del diodo y materiales semiconductores, aumentó el número de estaciones de radiocomunicaciones como por ejemplo aquellas empleadas en el “Servicio inalámbrico transatlántico comercial”. Sin embargo, al implementar dicho servicio, se presentó la imposibilidad de operar simultáneamente dos sistemas de comunicación con la misma frecuencia en una misma zona, ya que se interferían. Para solucionar este problema, se reglamentó la asignación de frecuencias para cada estación, además se desarrollaron mecanismos de modulación y técnicas de acceso al medio que permitieron un mejor desempeño para estos sistemas.

En el año 1971 aparece la primera red de área local inalámbrica llamada *ALOHA*, la cual antecede al sistema de control de acceso al medio llamado *CSMA (Carrier Sense Multiple Access)*, y tres años después, en 1974, se consolida la primera generación de red celular. Es hasta 1980 que el *IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)* realiza la primera reunión del “Comité de Normas de Redes de Área Local”, asignado como el proyecto 802, el cual tenía como tarea homologar en un solo estándar a todas las redes de área local (LAN). Iniciativa que más tarde derivó en el estándar IEEE 802.11 con el objetivo de homologar los protocolos de interconexión de los dispositivos inalámbricos.

Conforme el estándar IEEE 802.11 fue evolucionando, se introdujeron varias mejoras en función de la cobertura, tasa de transmisión entre otras características que se adecuaban mejor a las necesidades de conectividad de los hogares, oficinas y establecimientos comerciales. En la Tabla 1 se muestran algunas de las variantes de la familia 802.11.

802.11	Banda de operación	Tasa de transmisión	Rango de transmisión
a	5 GHz	54 Mbps	35 m
b	2.4 GHz	11 Mbps	35 m
g	2.4 GHz	54 Mbps	70 m
n	2.4 y 5 GHz	600 Mbps	70 m
ac	5 GHz	6.93 Gbps	35 m
ah	900 MHz	40 Mbps	1 Km

Tabla 1 Características de los estándares 802.11 [1].

Por otro lado, la miniaturización de los elementos de comunicación ha llevado a que se incorporen a distintos productos de la vida cotidiana como son automóviles, televisores, calefactores, aires acondicionados, entre otros. Asimismo, estos sistemas de comunicación se están usando en la automatización de procesos en la industria, agricultura, aplicaciones médicas, sistemas de transporte inteligentes, gestión de desastres, monitoreo ambiental, medición inteligente con sensores, vigilancia, y comunicación entre máquinas, entre muchas otras. La proliferación de este tipo de dispositivos de comunicación y sensado dio lugar al Internet de las Cosas (IoT).

Este nuevo paradigma en las comunicaciones trajo consigo varios retos como lo es la gestión de recursos energéticos y de espectro radioeléctrico para todos los dispositivos conectados en una red y que pueden estar desplegados en grandes áreas.

Existen diferentes tecnologías especializadas en redes de cobertura amplia y de baja potencia como LPWAN por sus siglas en inglés, *SigFox*, *DASH7*, *LoraWAN* ( Figura 1), entre otras. Estas tecnologías proveen buena cobertura y con una buena tasa de transmisión de datos, pero limitadas en la escalabilidad (número de nodos que soportan). Por otro lado, 3GPP, *LTE*, *WiMax* son estándares que pueden gestionar un número grande de dispositivos, pero con un consumo energético considerable. Teniendo como objetivo inicial el tener una amplia cobertura y un bajo consumo de energía, el estándar 802.11ah opera por debajo del 1 GHz del espectro radio eléctrico, y provee un amplio alcance de transmisión con una alta eficiencia energética y escalable. Esto hace que el estándar IEEE 802.11ah sea una tecnología viable para IoT. Una de las principales mejoras del estándar 802.11ah respecto a las demás versiones de 802.11, es la introducción del mecanismo *Restricted Access Window (RAW)*, que reduce la contención en redes con muchos dispositivos. El mecanismo RAW logra este objetivo restringiendo el acceso de nodos al canal en ranuras de tiempo dentro del RAW. Dentro de cada ranura, solo un número reducido de nodos pueden contender por el canal, lo cual reduce los tiempos de contención de manera importante.

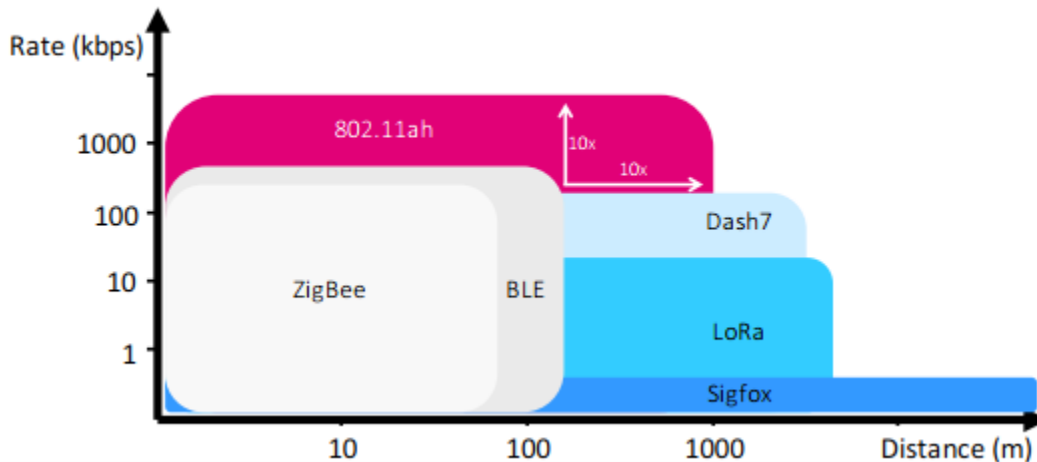


Figura 1 Comparación de IEEE 802.11ah con otras tecnologías [2].

El estándar IEEE802.11ah hereda la capa física del estándar IEEE 802.11ac con robustos esquemas de modulación y codificación (MCS) e introduce varias mejoras en la capa MAC que se verán más adelante. Sin embargo, el estándar no especifica varios parámetros de configuración del RAW, parámetros que como se verá más adelante tienen un impacto significativo en el rendimiento del mecanismo RAW y del estándar 802.11ah en general.

## 1.1. Definición del problema

El protocolo IEEE 802.11ah es una solución adecuada para distintos escenarios de IoT que necesitan soportar una gran cantidad de nodos en un área de cobertura muy grande. Sin embargo, al ser un estándar relativamente nuevo, ya que fue publicado en el año 2017, aun no hay muchos

dispositivos que operen bajo dicho estándar. Sin embargo, lo anterior no ha impedido que el estándar tenga un impacto importante en la investigación industrial y académica sobre el mismo.

A la fecha se han realizado una serie de evaluaciones experimentales del estándar a través de la simulación, los cuales han tenido distintos enfoques. Por ejemplo, en [3] los autores utilizan el esquema RAW con tráfico heterogéneo, saturado y en condiciones no ideales del canal. En dicho trabajo miden el rendimiento de la capa de control de acceso (MAC) de nodos con QoS. En [4], los autores estudian el desempeño del estándar simulando dos estrategias de agrupamiento RAW basándose en las clases de acceso (AC), y las prioridades de tráfico. La primera estrategia consiste en mezclar las AC dentro de los grupos RAW, mientras que la segunda consiste en hacer grupos simples en donde los grupos RAW solo contienen una sola AC. En este trabajo la evaluación del estándar se realiza tomando en cuenta las métricas de calidad de servicio (QoS) como son el *throughput*, delay, jitter y loss ratio. En [5], se propone un algoritmo que da prioridad a las estaciones que observan una alta frecuencia de colisiones reservando el primer *slot* de cada grupo RAW para estas estaciones. En [6], los autores estudian el rendimiento del estándar IEEE 802.11ah en términos de la tasa de errores (*bit error rate - BER*) utilizando diversos esquemas de modulación y codificación (MCS). Sin embargo, ninguno de estos trabajos hace un repaso del impacto individual de cada uno de los parámetros del estándar sobre el desempeño de este, tampoco estudian de manera detallada el desempeño de la red cuando el tráfico se transmite con diferentes prioridades al acceder al canal.

### **1.1.1. Metas generales**

Diseñar y simular distintos escenarios en los cuales se estudiará el impacto de distintos parámetros de configuración de los RAW en el desempeño de la red cuando las terminales transmiten con diferentes prioridades.

### **1.1.2. Metas específicas**

- Determinar el impacto de varios parámetros de configuración de las RAW en el desempeño de la red cuando un gran número de terminales compiten por el canal.
- Estudiar el impacto de la configuración del RAW cuando las terminales transmiten con diferentes prioridades en la capa MAC.

### **1.1.3. Metodología**

- Estudiar el funcionamiento del estándar IEEE 802.11ah en un simulador de eventos discretos (NS-3).
- Diseñar en el simulador diversos experimentos para analizar el impacto de varios parámetros del RAW en el desempeño de la red medida en término de caudal de datos (*throughput*), pérdida de paquetes, colisiones, saturación del canal entre otras.
- Análisis de los resultados de simulación

## **1.2. Estructura de la tesis**

El presente trabajo se encuentra organizado de la siguiente forma:

- Capítulo 2. Marco teórico. Se presentan conceptos básicos sobre redes inalámbricas basadas en el estándar IEEE 802.11ah, así como una breve descripción del simulador NS-3, el cual tiene un módulo con las características del estándar ya implementadas.

- Capítulo 3. Descripción del estándar 802.11ah
  - Capítulo 4. Descripción de los experimentos. Se describen las características de los diferentes escenarios simulados, así como los parámetros de simulación y los resultados obtenidos en cada uno de ellos.
- Capítulo 5. Conclusiones

# Capítulo 2 Marco teórico y Estado del Arte

Actualmente, las redes de comunicaciones tanto alámbricas como inalámbricas están constituidas principalmente de tres componentes que son: nodos, protocolos y medios de transmisión. Los nodos son los dispositivos o el hardware que alojan los datos y ejecutan las funciones de los protocolos. Los protocolos son una serie de reglas y acuerdos que dictan el comportamiento de los nodos, que por lo regular se establecen entre los fabricantes de los dispositivos siguiendo recomendaciones de la UIT o IEEE, entre otras. Los medios de transmisión, tal y como su nombre lo indica, es el medio físico por el cual viaja la señal electromagnética con los datos transmitidos.

Esta tesis se enfoca en la segunda capa (protocolos de acceso al medio), que generalmente se enfocan al conjunto de reglas que controlan el acceso al medio. Existen distintas formas de clasificar a los algoritmos de acceso al medio. Estas se basan en la forma en la que los elementos de la red se distribuyen entre ellos el espectro radio eléctrico, o se turnan con asignación de tiempo para realizar la transmisión y recepción de datos. Bajo esta idea los protocolos se clasifican en centralizados o distribuidos.

Los centralizados son aquellos protocolos en los que un solo dispositivo, como las torres de telefonía celular (GSM), se encarga de distribuir los recursos de tiempo y de espectro a cada elemento de la red. Los distribuidos son aquellos protocolos en los cuales todos los elementos de la red utilizan distintos algoritmos para comunicarse con sus vecinos y de esta manera establecer una manera de intercomunicarse entre ellos sin interferirse. Un ejemplo de estos últimos es CSMA/CA, en donde todos los elementos de la red primero sensan al medio para saber si este está libre, y de ser así transmiten. En caso contrario no lo hacen y es bajo este acuerdo que todos los elementos de la red trabajan.

Por otro lado [7] clasifica a los protocolos de acceso al medio en dos grupos que son los protocolos libres de conflicto y los protocolos de contención. Los protocolos libres de contención son aquellos que aseguran que las transmisiones hechas por los nodos sean siempre exitosas, ya que no tendrá problemas de interferencia con otro nodo de la misma red, y esto puede ser logrado mediante la asignación estática o dinámica de recursos espectrales y/o temporales. Los algoritmos no garantizan que el usuario tenga éxito en su transmisión, sino que el protocolo debe generar una manera de resolver conflictos una vez que estos ocurran. El problema con los protocolos libres de conflicto es que a medida que la red crece, los recursos se hacen limitados. En cambio, en los esquemas de contención, los usuarios inactivos no transmiten y, por lo tanto, no consumen los recursos del canal, dejando de esta manera más recursos para aquellos elementos que lo requieren.

## 2.1. CSMA

Los protocolos de acceso múltiple con detección de portadora (CSMA) son aquellos que cuando un usuario genera un nuevo paquete, el canal es sentido primero y, si el canal se encuentra libre, el paquete se transmite. Cuando dos o más terminales transmiten al mismo tiempo se produce una colisión, teniendo cada terminal que re-programar una retransmisión del paquete en otro momento. Básicamente, este proceso se puede dividir en tres fases en las que el emisor:

1. Escucha para ver el estado del canal.
2. Transmite (o no) el paquete.
3. Espera un reconocimiento (o no) por parte del receptor (ACK).

Existen variantes de CSMA como son:

- CSMA/CD: CSMA con detección de colisión (*Collision Detection - CD*), es la técnica utilizada por las redes alámbricas (Ethernet). Cuando un nodo se encuentra transmitiendo y, detecta una colisión cuando percibe un aumento en la amplitud de la señal por encima del nivel normal, el nodo detiene inmediatamente la transmisión del resto del paquete. Produce una colisión, cada nodo involucrado ejecuta un algoritmo que genera un tiempo aleatorio antes de que pueda sensar el canal nuevamente, lo cual reduce la probabilidad de futuras colisiones. Además, en [8] se menciona que otro factor que causa colisiones en CSMA/CD es el retardo de propagación, factor que hace ver a un nodo que el canal está libre cuando en realidad ya no lo está.
- CSMA/CA: CSMA con evasión de colisiones o *Collision Avoidance (CA)*. Con CA, el primer nodo sensa al canal y, en caso de estar libre, el nodo primero anuncia su intención de transmitir llamada *Request To Send (RTS)*. En caso de que este paquete llegue correctamente, el destinatario responderá con un mensaje CTS (*Clear To Send*), que garantiza que la transmisión del paquete posterior será exitosa y libre de colisiones. En primera instancia CSMA/CA parece ser superior a CSMA/CD. Sin embargo, esto tiene un impacto negativo en el desempeño de la red, porque no todos los mensajes RTS son realmente necesarios lo que retarda la transmisión de información y genera *overhead* de paquetes de control. CSMA/CA es usada ampliamente en redes inalámbricas, donde no es posible el uso de del CSMA/CD debido a la gran atenuación del canal inalámbrico.
- NP-CSMA: En esta variante no persistente de CSMA un nodo que encuentra el canal ocupado se abstiene de transmitir su paquete, y programa de manera aleatoria la retransmisión de este más adelante, lo que aumenta el retardo.
- 1P-CSMA: Cuando un usuario detecta el canal ocupado, persiste y transmite tan pronto como el canal queda desocupado.

## 2.2. Problema del nodo oculto

En redes inalámbricas, el problema del nodo oculto o terminal oculta se produce cuando un nodo es visible para un punto de acceso inalámbrico (AP), pero no a otros nodos que se comunican con ese AP. Este problema se muestra en la Figura 2. En dicha figura, cuando la terminal A transmite un paquete a la terminal B, dicho paquete no es sentido por la terminal C que, considerando que el canal está libre, puede transmitir generando una colisión en el nodo B. Debido a que los nodos transmiten paquetes completos ocasionado por a la imposibilidad de usar la técnica de detección de colisiones, el problema de la terminal oculta afecta significativamente el desempeño de redes inalámbricas. Para mitigar el problema de terminales ocultas, CSMA usa una técnica de evasión de colisiones (CA) basada en el intercambio de *frames* de control (RTS-CTS).

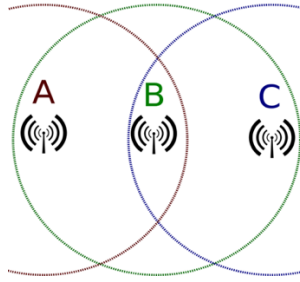


Figura 2 El nodo B puede detectar a los nodos A y C, pero estos últimos no pueden detectarse entre ellos.

### 2.2.1. RTS/CTS

El protocolo RTS/CTS es un mecanismo de acceso básico al canal. Primeramente, la estación que quiere transmitir envía una trama llamada “solicitud para enviar” o “*Request To Send*” (RTS). De ser el caso, la estación destino confirma la correcta recepción de la trama RTS devolviendo una trama “Listo para enviar” o “*Clear To Send*” (CTS). Estas tramas tienen entre sus diferentes campos la dirección del emisor y la duración del paquete de datos. Con este protocolo, se eliminan las colisiones del paquete de datos, pero se incrementa el *overhead* de *frames* de control. Es precisamente debido a este *overhead*, que RTS-CTS solo se usa cuando los paquetes de datos son de gran tamaño.

### 2.2.2. DCF

La función de DCF es regular el tiempo de espera de los nodos antes de comenzar a transmitir. Este mecanismo asigna a los nodos ranuras de tiempo aleatorias para acciones que tienen lugar después de la transmisión, generando una estructura coordinada que ayuda en la prevención de colisiones, para esto DCF recurre a distintos intervalos llamados:

- DIFS (*Distributed Inter-Frame Space*): El nodo sensa al medio y, si descubre que está libre, espera un intervalo antes de transmitir el paquete de datos o iniciar el procedimiento RTS/CTS.
- CW (*Contention Window*): Cuando el nodo asegura que el canal está libre, espera un periodo de tiempo aleatorio antes de iniciar la transmisión, y este periodo se duplica en caso de ocurrir una colisión, también llamado retardo exponencial (*Exponential Backoff*).
- SIFS (*Short Inter Frame Space*): Periodo de tiempo que tarda un nodo receptor en procesar un paquete de información antes de transmitir una respuesta.

A continuación, en la Figura 3 se muestra un ejemplo de cómo funciona el mecanismo de CSMA/CA con el protocolo RTS/CTS y DCF. Antes de transmitir, el nodo primero anuncia sus intenciones de iniciar una transmisión con una trama RTS, el nodo destino espera un periodo SIFS y contesta con un CTS para nuevamente a esperar un periodo SIFS e iniciar la transmisión de la información con sus respectivas cabeceras de capa física y capa MAC. Finalmente, el nodo receptor espera otro periodo SIFS para transmitir el ACK, e iniciar nuevamente la transmisión de un nuevo paquete de datos esperando un periodo DIFS.



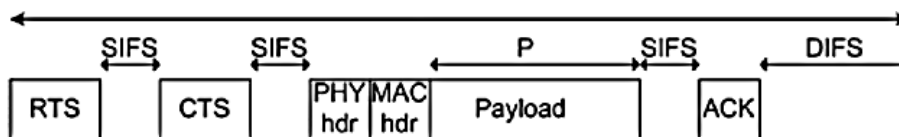


Figura 3 Ejemplo de transmisión con CSMA/CA [9].

## 2.3. Wi-Fi 802.11

De acuerdo con [10], una de las claves del éxito comercial del estándar IEEE 802.11 ha sido la buena inter-operabilidad existente entre equipos de diferentes fabricantes, labor que ha sido dirigida por la Wi-Fi Alliance. Este organismo cuenta con más de 200 empresas entre sus miembros, ha fomentado la tecnología Wi-Fi y garantizado su buen uso. Todos los equipos certificados llevan el sello Wi-Fi, razón por la que a estos estándares se los conoce también como Wi-Fi.

Actualmente, son seis los estándares dentro de la familia IEEE 802.11 que están siendo utilizados, los cuales son: 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac y 802.11ax (algunas de sus características son descritas en la Tabla 1). Cada estándar llegó con el objetivo de proporcionar conectividad en los hogares, oficinas y establecimientos comerciales. El estándar 802.11 se encuentra en los niveles inferiores del modelo OSI como está en la Figura 4, en la capa física y en la capa de control de acceso al medio (MAC).

Algunas características interesantes de los estándares 802.11 son:

- 802.11a: Esta versión a 5 GHz, emplea una modulación 64-QAM y codificación OFDM. Alcanza una velocidad nominal de hasta 54 Mbps, aunque con un alcance limitado a 35 m, algo que complica la infraestructura de la red al ser necesarios más AP. Otras velocidades que puede alcanzar son 48; 36; 24; 18; 12; y 6 Mbps.
- 802.11b Nació como una versión alternativa del 802.11 original para WLAN corporativas. Ofrece velocidades de 1; 2; 5.5; y 11 Mbps y un alcance, que depende de la velocidad y los obstáculos, de entre 35; 50 y 300 metros. Trabaja en la banda libre de 2.4 GHz.
- 802.11g: El estándar IEEE 802.11g está diseñado para alcanzar velocidades de hasta 50 Mbps, la misma que IEEE 802.11a en la banda de 2.4 GHz. Una de sus ventajas es que puede coexistir con todos los equipos que operan con IEEE 802.11b ya instalados, pero a 11Mbps cómo lo marca dicho estándar.
- 802.11n: Mejora significativamente el rendimiento de la red más allá de los estándares, como 802.11b y 802.11g, con un incremento en la velocidad máxima de transmisión de 54 Mbps a un máximo de 600 Mbps. Puede trabajar en la banda de 2.4 o 5 GHz, también incorpora MIMO y *channel Bonding*.
- 802.11ac: Es un estándar Wi-Fi que ofrece un mayor rendimiento a las WLAN que 802.11n. IEEE introdujo 802.11ac en 2013. Desde entonces, Wi-Fi Alliance cambió el nombre de 802.11ac a Wi-Fi 5 para colocarlo en contexto con la siguiente generación, Wi-Fi 6, también conocida como 802.11ax. 802.11ac transmite a una velocidad máxima de 1300 Mbps, dos veces más rápido que los 600 Mbps de 802.11n. Las variaciones en el hardware, la arquitectura de la red, las aplicaciones utilizadas e incluso la composición de las paredes de la oficina pueden tener enormes efectos en el rendimiento de la red Wi-Fi [11].

- 802.11ax: También conocido como Wi-Fi 6 se basa en las fortalezas de 802.11ac, agregando eficiencia, flexibilidad y escalabilidad que permite que las redes nuevas y existentes aumenten la velocidad y la capacidad con aplicaciones de próxima generación. El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) propuso el estándar 802.11ax para que pueda combinar la libertad y la alta velocidad de la tecnología inalámbrica Gigabit Ethernet con la confiabilidad y la previsibilidad que se encuentran en las radios con licencia [12].

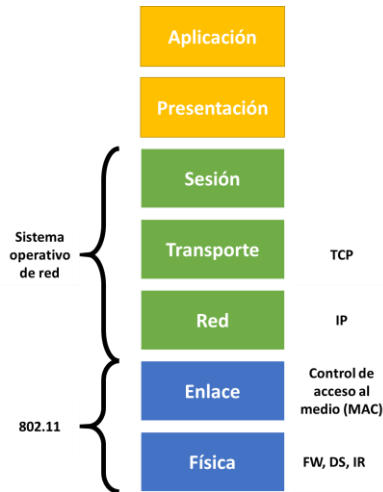


Figura 4 Modelo OSI y Familia IEEE 802.11.

## 2.4. Topología de red basada en el estándar 802.11

La manera típica de conectar una red Wi-Fi para proporcionar acceso a internet de los distintos dispositivos inalámbricos de su entorno [13], señala que el estándar IEEE 802.11 define el concepto de Conjunto Básico de Servicio (*BSS, Basic Service Set*) que consiste en dos o más nodos inalámbricos o estaciones que se reconocen una a la otra y pueden transmitir información entre ellos. Un BSS (Figura 5) puede intercambiar información de dos modos diferentes:

- Cada nodo se comunica con el otro en forma directa y sin ninguna coordinación. Este modo es comúnmente llamado *Ad-Hoc* o *IBSS (Independent Basic Service Set)*. Este modo solo permite la transmisión entre los nodos inalámbricos y no resuelve el problema de extender una LAN cableada.

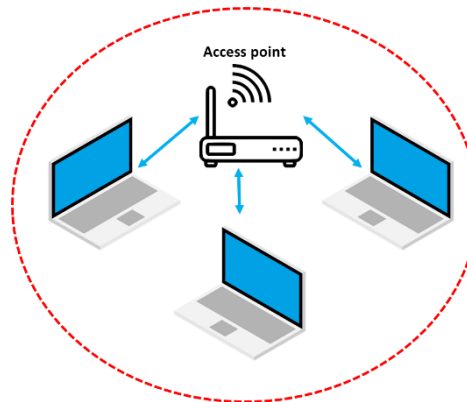


Figura 5 Infraestructura BSS.

- Un elemento llamado comúnmente AP (Access Point) coordina la transmisión entre los nodos inalámbricos. Este modo es llamado modo Infraestructura, y permite vincular la red inalámbrica con la red cableada ya que el AP actúa como bridge entre las dos redes. La existencia de varios AP conectados a un sistema de distribución (DS: *Distribution System*), que puede ser una LAN cableada es lo que denominamos EBSS (*Extended Basic Service Set*).

## 2.5. Calidad de servicio y EDCA

De acuerdo con la recomendación ITU E.800, se define como calidad de servicio al "efecto global de las prestaciones de un servicio que determinan el grado de satisfacción de un usuario al utilizar dicho servicio". En las redes se traduce como la adecuada forma de planear una red, tal que permita el control de la congestión, mediante parámetros como:

- Eficiencia
- Consumo energético
- Retardos en la transmisión
- Ancho de banda

Con respecto a la calidad de servicio la IEEE lanza una versión llamada 802.11e, el cual es publicado en 2005 y fue desarrollado para solventar los problemas de tener aplicaciones multimedia coexistiendo en la misma red, y poder ofrecer calidad de servicio para cada una. IEEE 802.11e fue diseñado para soportar la variación de requisitos en redes WLAN, para lo cual se agregaron mecanismos de priorización de flujos de tráfico entre aplicaciones y entre terminales.

Los mecanismos de priorización de tráfico maximizan el rendimiento de la red, ya que ajusta de manera dinámica los parámetros de acceso de cada nodo tomando como referencia la carga de red. Para lograr este propósito, el estándar IEEE 802.11e realiza adaptaciones en la capa de acceso al medio que permiten priorizar unas estaciones respecto otras.

Otra característica de IEEE 802.11e es que la transmisión de ACKs como la respuesta para cada trama recibida correctamente es opcional. Si esto es así, entonces el desempeño de la red se vería comprometido, pero esto no es así, ya que esto responde a las necesidades de tráfico que es sensible a los retardos. Trabajar sin ACK implica entonces tener que esperar un tiempo SIFS antes de que el nodo intente transmitir otra vez. Sin embargo, ese tiempo SIFS no puede ser igual al del estándar 802.11 tradicional por la misma razón expuesta anteriormente de tráfico sensible al retardo, para lo cual IEEE 802.11e introduce las siguientes mejoras.

- Cada nodo tendrá una prioridad dependiendo del tipo de tráfico con el que esté operando y a cada prioridad se le asignará una categoría de acceso diferente.
- El estándar IEEE 802.11e define un intervalo AIFS (*Arbitration Inter Frame Space*): Es el intervalo mínimo desde que el nodo detecta al medio como libre hasta que inicia transmisiones. El tamaño del AIFS depende de la prioridad, así que, si la prioridad es pequeña, el tamaño del AIFS será grande y, por el contrario, si la prioridad es grande el tamaño del AIFS será pequeño. El intervalo AIFS es utilizado en lugar del intervalo DIFS, tomando como referencia el valor asignado para categoría de acceso (AC) para que el nodo empiece su proceso de *backoff*.
- Cada categoría tiene un CWmin y un CWmax, que son las ventanas de contención tanto para el mecanismo de *backoff* de una estación antes de acceder al medio, como para el

valor máximo de espera para transmitir que puede tomar un nodo antes de descartar un paquete, respectivamente.

- Asimismo, cada nodo puede transmitir varias tramas consecutivas durante un tiempo denominado como TXOP (*Transmission Opportunities*), que al igual que las ventanas tendrá características adecuadas para cada categoría de acceso.
- También modifica el modo HDF (*Hybrid Coordination Function*) del estándar IEEE 802.11 para combinar los modos de coordinación centralizado y distribuido. Dentro de la modificación de HCF están las funciones de los AC a nivel MAC, en donde los paquetes son etiquetados con un identificador de prioridad (TID) acorde a sus necesidades de calidad de servicio (QoS). Dentro de las modificaciones de HCF están los modos de operación EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*) y HCCA (*Controlled Channel Access*).

El mecanismo EDCA (ver Figura 6) en redes inalámbricas controla el acceso al canal con base a un mecanismo que diferencia a los tipos de servicio en *Access class*, y que de acuerdo con la calidad de servicio (QoS) son: AC: AC\_BK (*Background*) para las prioridades más bajas, AC\_BE (*Best Effort*), AC\_VI (Video) y AC\_VO (*Voice*) para las prioridades más altas. De acuerdo con su prioridad, cada trama será signada en alguna de esas cuatro categorías o AC. La Tabla 2 muestra las clases de acceso y sus características ordenadas del menos prioritario al más prioritario. Cada AC ejecuta un proceso de *backoff* independiente, para determinar en qué momento dará inicio la transmisión de sus tramas. Si el medio está libre, inicia transmisiones, de lo contrario suspende la transmisión y reinicia el proceso hasta que el medio este libre durante un tiempo AIFS. Después de una transmisión exitosa el nodo receptor trasmite un ACK después de un tiempo AIFS, pero si el nodo transmisor no recibe el ACK, entonces asume que ocurrió una colisión o interferencia por lo que inicia un proceso de retransmisión.

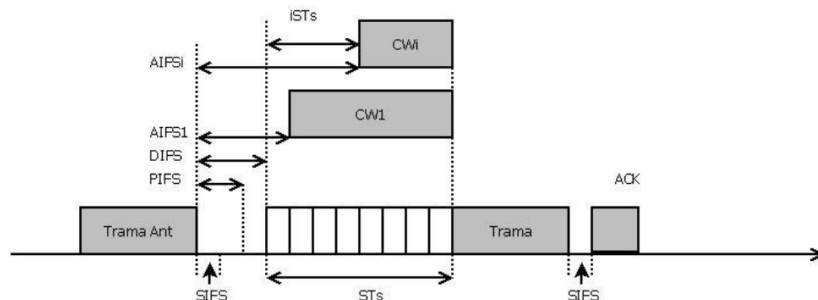


Figura 6 Esquema básico del mecanismo EDCA [14].

En esencia, el mecanismo de espera de IEEE 802.11e es similar al de DCF, pero en este caso los tiempos no son fijos, ya que dependen de la clase de acceso a la que estén asignados. Dicha dependencia se muestra por medio de la siguiente ecuación.

$$AIFS = SIFS * AISFN * slot\_time \quad (1)$$

Donde *slot\_time* es el tamaño del *backoff* y AISFN (*Arbitration Inter Frame Space Number*) es utilizado para diferenciar entre las AC. Esto con el fin de asignar menores tiempos de espera a los nodos con tráfico de mayor prioridad cuando estos tengan que ejecutar el proceso de *backoff*.

En el presente trabajo se habla del estándar IEEE 802.11ah el cual hereda características del estándar 802.11e para dar soporte de calidad de servicio.

Prioridad	Clase de acceso	CWmin	CWmax	AISFN	Max TxOP
Menor prioridad	<i>Background</i> (AC_BK)	15	1023	7	0
	<i>Best Effort</i> (AC_BE)	15	1023	3	0
Mayor prioridad	Video (AC_VI)	15	15	2	3.008ms
	<i>Voice</i> (AC_VO)	7	7	2	1.504ms

Tabla 2 Clases de acceso para cada tipo de tráfico [15].

La definición de los tipos de tráfico mostrados en la Tabla 2 quedaría de la siguiente manera:

- BK (*Bulk Traffic*): Es el tráfico que corresponde a aquellas aplicaciones que no necesitan de algún tratamiento en específico como por ejemplo el correo electrónico, la transferencia de archivos no críticos o la solicitud de acceso a páginas web.
- BE (*Best Effort*): Tráfico que deberá transmitirse tan pronto como sea posible, tras atender a aquel que le sea más prioritario. El tráfico de este tipo podría ser una sesión Telnet o de control remoto de un equipo, tráfico que, aunque no sea tan crítico como los anteriores, si será sensible a retardos y pérdidas, dando sensación al usuario de falta de respuesta [16].
- VI (Video): Categoría que pertenece al tráfico de video el cual necesita prioridad para no degradar su calidad.
- VO (Voz): Esta categoría pertenece al tráfico de Voz.

## 2.6. Modelos de propagación en redes inalámbricas

En redes inalámbricas, la ruta que puede seguir la onda radioeléctrica entre transmisor y receptor puede ser lineal si se trata de un entorno rural, es decir, que no existen medios físicos que intervengan en su propagación. Sin embargo, en ambientes urbanos esto no es posible ya que la trayectoria puede encontrar una serie de obstáculos. Es por esta razón es necesario un modelo de propagación para determinar, con la mayor precisión posible, la cobertura de las redes inalámbricas. En [17] se establece “Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos utilizados para representar las características de radio de un determinado entorno”. El modelado comprende distintos factores como son distancias, potencia de transmisión, características de las antenas transmisora/receptora y también una serie de valores estadísticos tomados de mediciones realizadas en determinadas zonas.

El objetivo principal de los modelos de propagación es predecir la potencia de recepción a una determinada distancia del transmisor, así como las variaciones de la potencia que tiene la señal en la zona de cobertura.

Los modelos de propagación se pueden clasificar en dos tipos principales:

- Modelos *Outdoor*: Se trata de los primeros modelos que se realizaron, debido a que era necesario determinar las zonas de cobertura para los sistemas de radio y televisión, y después para los sistemas de telefonía móvil. De acuerdo con las características del sistema de comunicación, este tipo de modelos pueden tomar en cuenta distintos factores como la presencia de obstáculos tales como árboles, edificios y estructuras que representen obstáculos, también considera perfiles del terreno, índices de humedad e índices de precipitaciones.

- Modelos *Indoor*: Son modelos que comenzaron a desarrollarse con la llegada de las redes WLAN donde era necesario conocer la cobertura que proporciona un AP, y cuyo entorno de propagación ya no sería en grandes extensiones de terreno al aire libre, más bien en ambientes cerrados.

En el presente trabajo de tesis se estudia el desempeño del estándar IEEE 802.11ah, que es un estándar definido principalmente para ambientes *outdoor*, y en donde cientos/miles de sensores remiten sus mediciones a un nodo concentrador (AP). Por esta razón solo se presenta a continuación los modelos *outdoor* más representativos, y en especial el modelo que se utilizó en las simulaciones.

### 2.3.1. Modelo de propagación en espacio libre.

Es el modelo básico para predecir la potencia de la señal cuando esta llega al receptor, siempre y cuando exista una clara línea de vista entre transmisor y el receptor. Este modelo es principalmente utilizado para sistemas de comunicación satelital y enlaces de microondas, debido a que predice cuanto decae la potencia en función de la distancia de separación entre el transmisor y el receptor.

La potencia recibida por la antena receptora está dada por la siguiente ecuación:

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

Donde:

$P_t$  es la potencia transmitida

$P_r$  es la potencia recibida que está en función de la separación entre el transmisor y el receptor.

$G_t$  es la ganancia de la antena transmisora.

$G_r$  es la ganancia de la antena receptora.

$d$  es la distancia de separación entre el transmisor y el receptor dada en metros.

$L$  es el factor de pérdida del sistema debidas a la atenuación de la línea de transmisión conectada a la antena, pérdidas por filtros y pérdidas de la antena.

$\lambda$  es la longitud de onda en metros.

### 2.3.2. Modelos *indoor*

Los modelos de propagación *indoor* surgieron por el interés de caracterizar la propagación en ambientes cerrados como el interior de los hogares, fábricas y en general en el interior de las construcciones. Estos modelos consideran una serie de factores como los expuestos en los modelos de *outdoor*, sin embargo, consideran otros factores como los materiales con los que está construido el edificio o sitio. Esto también implica tomar en cuenta fenómenos como la reflexión, la difracción y la dispersión de la señal.

A continuación, se mencionan algunos modelos de los más relevantes que se encuentran disponibles es el simulador NS3 y que se usaron en el presente trabajo.

### **Modelo Log-Distance**

Este modelo plantea que las pérdidas de transmisión tienen una dependencia lineal con el logaritmo de la distancia a medir con respecto a la distancia de referencia, independientemente de si se trata de ambientes interiores o exteriores. Para el caso de ambientes interiores, el promedio de la pérdida de potencia se expresa como función un exponente de pérdidas  $\gamma$ , con la expresión:

$$P_L(dB) = P_L(d_0) + 10\gamma \log \frac{d}{d_0} + X_\sigma \quad (3)$$

Donde:

$P_L(d_0)$  son las pérdidas de propagación a una distancia  $d_0$  en dB. Este valor puede ser obtenido del modelo de espacio libre visto anteriormente o de estadísticas obtenidas de mediciones hechas a dicha distancia.

$d_0$  es la distancia de referencia dada en Km.

$d$  es la distancia entre el transmisor y el receptor.

$X_\sigma$  es una variable aleatoria con distribución normal y desviación estándar igual a  $\sigma$  y media cero. Este valor hace referencia a la atenuación causada por desvanecimiento, en el caso de que no haya desvanecimiento el valor que toma igual a cero.

Este modelo ha sido implementado en el simulador NS-3 a través de la clase ns3::LogDistancePropagationLossModel, el cual tiene los siguientes parámetros:

"Exponent"=  $\gamma$

"ReferenceDistance"=  $d_0$

"ReferenceLoss"=  $P_L(d_0)$

"Frequency"=900MHz que es la frecuencia a la que opera el estándar IEEE 802.11ah

### **Modelo de propagación de UIT-R**

Tal y como su nombre lo indica, este modelo fue desarrollado por la UIT-R en el año 2019 identificada como la recomendación UIT-R P.1238 para predecir la atenuación de las señales en rango comprendido de 900 MHz a 100GHz en ambientes interiores. Este modelo, al igual que el anterior, considera reflexión, difracción y refracción de la señal, además de confinamiento de la energía en pasillos, presencia de personas y objetos en movimiento.

La pérdida queda modelada entonces de la siguiente manera:

$$L(dB) = 20 \log(f) + 10 * \gamma * \log(d) + L_f N_f - 28 \quad d > 1, N_f \geq 1 \quad (4)$$

Donde:

$f$  es la frecuencia de operación

$\gamma$  es el coeficiente de pérdida de potencia debida a la distancia

$d$  es la distancia de separación dada en metros entre el transmisor y el receptor.

$L_f$  corresponde al factor de pérdida ocasionada cuando la señal atraviesa el suelo dado en dB.

$N_f$  es el número de suelos o pisos atravesados por la señal antes de llegar al receptor y cuyos valores de la Tabla 4 son establecidos por la misma recomendación.

Los valores de  $\gamma$  y  $L_f$  son dados por la misma recomendación (ver Tabla 3) para ambientes residenciales, de oficina y comerciales, y para diferentes frecuencias.

Frecuencia	Edificio residencial	Edificio de oficinas	Edificio comercial
900 MHz	-	33	20
1.2-1.3 GHz	-	32	22
1.8-2.0 GHz	28	30	22
4 GHz	-	28	22
60 GHz	-	22	17

Tabla 3 Coeficientes de pérdida de potencia,  $\gamma$  para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores [18].

Frecuencia	Edificio residencial	Edificio de oficinas	Edificio comercial
900 MHz	-	9 (1 piso) 19 (2 pisos) 24 (3 pisos)	-
1.8-2.0 GHz	$4N_f$	$15+4(N_f-1)$	$6+3(N_f-1)$

Tabla 4 Factores de pérdida de penetración en el suelo,  $L_f$ (dB) [18].

## 2.7. Estado del arte

Como se mencionó anteriormente, a la fecha distintos trabajos han sido desarrollados con el fin de evaluar el desempeño del estándar IEEE 802.11ah como la alternativa para el despliegue de redes IoT. En esta sección se detallan algunos de estos trabajos.

En [4] los autores realizaron un estudio del desempeño del estándar simulado dos estrategias de agrupamiento RAW basándose en las clases de acceso (AC) y las prioridades de tráfico. La primera estrategia consiste en mezclar las AC dentro de los grupos RAW, mientras que la segunda consiste en hacer grupos simples en donde los grupos RAW solo contienen una sola AC. En este trabajo, la evaluación del estándar la realizan tomando en cuenta las métricas de calidad de servicio QoS (*Throughput, delay, jitter y loss ratio*).

En [6], los autores examinan el rendimiento del estándar IEEE 802.11ah en términos del *bit error rate* (BER) utilizando el esquema de modulación y codificación (MCS). Este trabajo considera mayores rangos de transmisión en escenarios con y sin desvanecimiento en entornos urbano en donde no se implementan técnicas para mitigar el desvanecimiento.

En [5], consideran QoS y proponen un algoritmo que da prioridad a las estaciones que tienen una alta frecuencia de colisiones, reservando el primer *slot* de cada grupo RAW para esas estaciones y ajustando la duración del *slot* de acuerdo con la cantidad total de tráfico de red.

En [19], los autores evalúan el desempeño del estándar IEEE 802.11ah, proponiendo un esquema de agrupamiento de prioridades compatible con QoS y combinando técnicas basadas en contención y reservación. Este diseño reduce las colisiones en la red y ayuda a cumplir con los requerimientos de QoS de cada nodo de la red.



En [3], los autores evalúan un modelo analítico basado en cadenas de Markov M/G/1, considerando que los RAW contienen nodos con tráfico heterogéneo, no saturado y en condiciones no ideales del canal. Este modelo permite evaluar el rendimiento del mecanismo RAW en redes IoT con tráfico heterogéneo, en donde coexisten nodos con QoS y sin QoS.

En [20], los autores proponen dos escenarios: el primero consiste en una red con 30 nodos los cuales fueron incrementados en pasos de 30 hasta llegar a los 150 nodos. Todos ellos contenidos en 1 RAW con 1 *Slot*; El segundo escenario cambia el número de grupos RAW con la relación  $N/2$ , en donde N es el número de nodos que conforman la red. Esto con el objetivo de revisar el impacto en el *throughput* al realizar este cambio. Para ambos escenarios se ocuparon los parámetros EDCA por default.

En [21], los autores evalúan el mecanismo RAW en términos de *throughput*, latencia y eficiencia energética considerando el impacto del número de nodos, las tasas de transmisión de los nodos y la distribución de los nodos en los RAW y la duración de los RAW. Esta evaluación exhaustiva da como resultado pautas para el desarrollo de estrategias dinámicas de agrupación RAW en una variedad de escenarios de red IoT con condiciones variables.

En [22], los autores desarrollan un modelo analítico para calcular el rendimiento y el consumo de energía de IEEE 802.11ah, asumiendo probabilidades de colisión y error ya conocidas aplicando tanto los mecanismos de acceso básicos como al mecanismo RTS/CTS.

A diferencia de trabajos anteriores, el presente trabajo considera QoS; es decir, considera la coexistencia de varios nodos/aplicaciones con diferentes calidades de servicio (QoS), y diferentes requerimientos de acceso al medio en la operación del estándar 802.11ah. En este contexto, en el presente trabajo analizamos la eficiencia del mecanismo RAW a dos niveles distintos. Por un lado, primero estudiamos a nivel de agrupación RAW, y cómo los nodos se reparten en un determinado número de RAW. Por otro lado, también consideramos la agrupación interna de cada RAW al subdividir cada RAW en varios *slots*. Ambos niveles se estudiaron en escenarios de cobertura amplia y con una gran cantidad de nodos como lo marca la operación del estándar.

## Capítulo 3 Estándar IEEE 802.11ah

La miniaturización de los dispositivos de comunicaciones ha dado lugar a que estos puedan ser instalados en distintos dispositivos. Como resultado se ha generado utilización excesiva y despliegues irregulares de las redes, lo que también ha saturado los espectros de 2.4 GHz y 5 GHz. El estándar 802.11ah surgió en año 2016 como parte de la familia de estándares 802.11 en bandas inferiores a 1 GHz. El objetivo de este estándar es abordar los principales desafíos del internet de las cosas (IoT), como son la conectividad entre un gran número de estaciones que están restringidas por la energía y además están desplegadas en un área amplia [2].

El estándar IEEE 802.11ah propone una nueva capa física (PHY), y mejoras en la capa de acceso al medio (Medium Access Control o MAC). El estándar 802.11ah, al trabajar en una banda inferior de 1 GHz, cuenta con las características favorables de propagación ya que las señales penetran a través de paredes y obstrucciones mejor que las redes que operan en 2.4 y 5 GHz. Este estándar proporciona un gran alcance de transmisión de bajo costo, convirtiéndolo en un sistema altamente atractivo para redes de sensores desplegadas en ciudades y granjas inteligentes, donde el número de dispositivos que participan es mucho mayor al del sistema actual de 802.11.

Los dispositivos en las redes de sensores es probable que sean dispositivos que funcionen con baterías, y por lo tanto, el ahorro de energía se vuelve mucho más crítico para el rendimiento del estándar 802.11ah. Otro factor trascendente para este estándar es el tener un buen esquema de agrupamiento para tener el mejor rendimiento en la asignación de recursos a cada dispositivo.

### 3.1. Capa física

La capa física PHY del estándar 802.11ah se basa en la operación y funcionamiento del estándar IEEE802.11ac que trabaja con anchos de banda de 80 MHz, 160 MHz adicionales a los 20 MHz y 40 MHz con los que trabaja el estándar previo 802.11n. El estándar IEEE 802.11ah define anchos de banda para canales de 2 MHz, 4 MHz, 8 MHz y 16 MHz, dependiendo de las necesidades de cobertura y tasa de transmisión, además define el canal de 1 MHz con el objetivo de brindar cobertura extendida [23].

### 3.2. Atribución de frecuencias

Las bandas que se encuentran por debajo del 1 GHz del espectro radioeléctrico disponibles son diferentes dependiendo de las disposiciones de cada país y, por lo tanto, 802.11ah ha definido la asignación de frecuencias sobre la base de los respectivos espectros inalámbricos disponibles en varios países, principalmente en Estados Unidos, Corea del sur, China, Europa, Japón y Singapur, entre otros.

Por ejemplo, en Estados Unidos (ver Figura 7), toman una banda de 26 MHz entre los 902 MHz y 928 MHz, por lo tanto, el número de canales disponibles de 1 MHz es de 26. Con el propósito de lograr un mayor ancho de banda, el estándar IEEE 802.11ah mantiene la técnica de unión de canales como en IEEE 802.11n, es decir, varios canales estrechos adyacentes se unen entre sí para producir un canal más ancho. El canal más ancho conformado en los Estados Unidos es un canal de 16 MHz que también es el ancho de banda más amplio en el sistema 802.11ah [23].

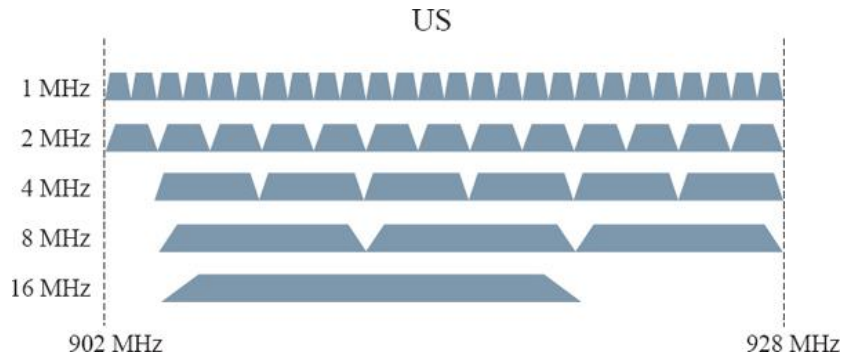


Figura 7 Espectro asignado en EEUU [23].

En el caso de México, aún no se encuentra regulado los sistemas basados en 802.11ah por lo que aún no está atribuido a ningún servicio de acuerdo al cuadro nacional de atribución de frecuencias (CNAF), pero suponiendo que sí se ocupa el mismo ancho de banda que en EE.UU, es decir, de 902 a 928 MHz, tendría que compartir el espectro con los servicios Fijo, Móvil aeronáutico, Aficionados y Radiolocalización. Sin embargo, de acuerdo con la nota MX68 (ver Figura 8), esta misma banda de frecuencias también está designada para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ISM), por lo cual los servicios de radiocomunicación que funcionan en estas bandas deben aceptar la interferencia perjudicial resultante de estas aplicaciones. Por lo tanto, el funcionamiento de estas redes queda sujeta a las especificaciones técnicas que se encuentran contenidas en la NOM-121-SCT1-2009, o bien la legislación mexicana tendría que encontrar un lugar propicio dentro del CNAF para que los sistemas basados en 802.11ah puedan convivir con los sistemas ya implementados en el país.

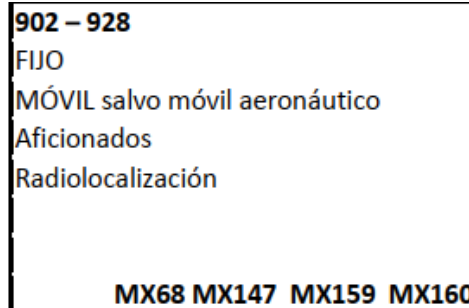


Figura 8 Atribución de la banda de 902 a 928 MHz [24].

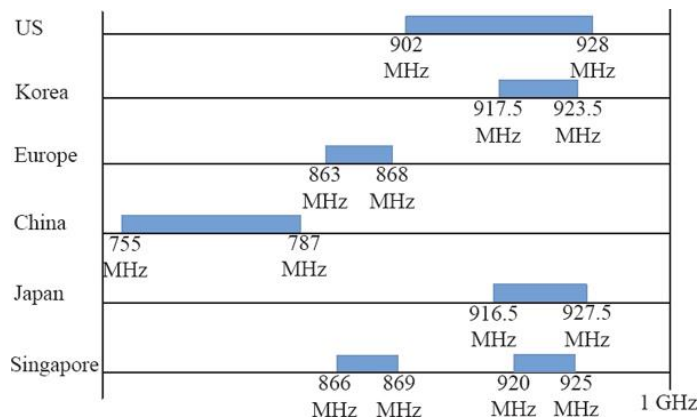


Figura 9 Espectros asignados a la operación de 802.11ah de cada país [23].

### 3.3. Modos de transmisión

En IEEE 802.11ah, los canales de 1 MHz y 2 MHz han sido aceptados como anchos de banda comunes de tal manera que las estaciones o nodos que operan con IEEE 802.11ah tienen dos modos de transmisión. El primer modo de transmisión es para un ancho de banda igual o mayor a 2 MHz, y el segundo modo de transmisión es para un ancho de banda de 1 MHz. Para el primer modo de transmisión, la capa PHY usa las técnicas de la capa PHY de 802.11ac donde se adoptan técnicas como la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) y técnicas MIMO.

En la Tabla 5 se muestran las velocidades correspondientes de los datos utilizando el canal de 2 MHz con una única secuencia especial (MCS). NSS representa el número de flujos espaciales, que es 1 en este caso. NSD denota el número de sub-portadoras utilizadas en la transmisión de datos. En el canal de 2 MHz, la transformada rápida de Fourier (FFT) se utiliza para generar un símbolo OFDM, el número de sub-portadoras utilizadas para la transmisión de datos es de 52. “NDBPS indica el número de bits de datos por símbolo, que es calculado por el número de bits de datos por sub-portadora por símbolo multiplicado por el número de sub-portadoras de datos” [23].

Índice MCS	Modulación	Code Rate	NSD	NDBPS	Data Rate (Mbps)	
					GI normal	GI corto
0	BPSK	1/2	52	26	0.65	0.72
1	QPSK	1/2	52	52	1.3	1.44
2	QPSK	3/4	52	78	1.95	2.17
3	16-QAM	1/2	52	104	2.6	2.89
4	16-QAM	3/4	52	156	3.9	4.33
5	64-QAM	2/3	52	208	5.2	5.78
6	64-QAM	3/4	52	234	5.85	6.5
7	64QAM	5/6	52	260	6.5	7.22
8	256-QAM	3/4	52	312	7.8	8.67
9	256-QAM	5/6	NO ES VALIDO			

Tabla 5 S1G MCSs para 2 MHz, Nss=1 [25].

*Data Rate* representa las velocidades de datos correspondientes que se calculan como el número de símbolos por segundo multiplicado por NDBPS. Un intervalo de guarda (IG) es una parte de un símbolo OFDM que contiene datos redundantes que se usa para prevenir la interferencia entre símbolos (ISI) en una transmisión OFDM. En el caso de la adopción de IG corto de 4  $\mu$ S, la duración de un símbolo OFDM es de 36  $\mu$ S, en contraste cuando se utiliza IG normal de 8  $\mu$ S, la duración del símbolo OFDM pasa a ser de 40  $\mu$ S. En consecuencia, las tasas de datos alcanzadas mediante la adopción de IG cortas dan como resultado un incremento aproximado del 11% de la tasa de datos obtenidos en comparación con el caso de la adopción de IG normal [23].

El objetivo de usar un canal de 1 MHz es ampliar el rango de transmisión. Con este fin, un nuevo índice de MCS, llamado MCS1\_0, se incluye para la transmisión de largo alcance, además de los MCS de 802.11ac. Este MCS no es más que un modo de MCS\_0 con repetición, por lo que el rango de transmisión se puede ampliar con la repetición de símbolos incrementando la fiabilidad de la transmisión inalámbrica.

### 3.4. Capa MAC

Para el diseño de la capa MAC, el estándar IEEE 802.11ah ha mejorado algunas características del ya existente estándar IEEE 802.11n con el objetivo de que el número posible de estaciones asociadas al punto de acceso sea mayor a las 2007, que es el número de estaciones que se establecen en el estándar 802.11. Para lograr tal incremento, una estructura jerárquica AID se ha definido para 802.11 ah como se muestra en la Figura 10. Esta estructura se compone de 13 bits, con lo cual el número de estaciones que se puede expresar es  $2^{13}-1=8191$ .

La estructura AID está conformada de cuatro niveles jerárquicos los cuales son: página, bloque, sub-bloque y el índice de la estación en el sub-bloque. Es decir, cada estación pertenece a un determinado sub-bloque, y cada sub-bloque pertenece a un determinado bloque. Del mismo modo, varios bloques forman una página, que es el nivel más alto que puede contener hasta 2048 estaciones.

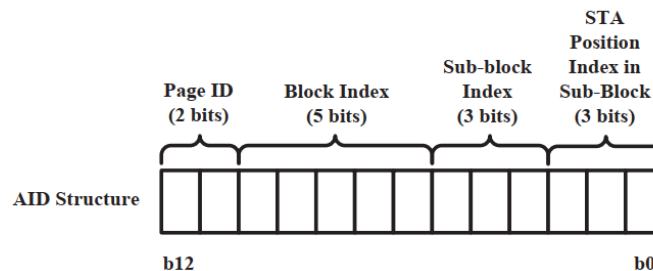


Figura 10 Estructura AID [23].

Esta estructura jerárquica permite agregar más estaciones con una longitud dada de una trama de bits. Por ejemplo, cuando se integran más estaciones a una red, simplemente podemos incluirlos en un bloque o un sub-bloque y utilizar el ID de bloque o el ID sub-bloque para indicarlo en lugar de incluir la totalidad del AID. La estructura jerárquica es adoptada para facilitar la agrupación de nodos, de manera que la característica de la estructura jerárquica AID ayuda a que la agrupación de las estaciones sea mucho más fácil. La agrupación puede ser aplicada para diversos fines, tales como el ahorro de energía, la asignación de recursos y el acceso eficiente al canal.

### 3.5. Acceso al canal

El estándar define dos modos de operación: *Traffic Indication Map* (TIM) y no-TIM. El modo TIM es típicamente usado por nodos con altos requerimientos de ancho de banda o por nodos que necesitan una comunicación bidireccional. Para las estaciones no TIM, el AP puede permitirles solicitar tráfico de enlace descendente almacenado en búfer o transmitir tráfico de enlace ascendente en cualquier momento. Sin embargo, podría haber tráfico incontrolable en estas estaciones no TIM. Por ejemplo, si un gran número de estaciones despiertan al mismo tiempo, la contención entre estas estaciones podría tener resultados como retrasos de acceso al canal excesivos e incluso colisiones. Para hacer que el tráfico de las estaciones no TIM se encuentre bajo control, el AP puede dejar que las estaciones despierten en un momento predefinido para que el tiempo de sensado de estas estaciones no TIM y sus intentos de acceso al canal se separen temporalmente. Para intercambiar la información del *beacon* o de sincronización entre el AP y las estaciones, el estándar IEEE 802.11ah ocupa otra herramienta llamada *Target Wake Time* (TWT), que permite

controlar la solicitud de asociación y la respuesta de asociación de las tramas. En TWT, hay cuatro campos: el tipo de solicitud, el tiempo de destino, la duración mínima de atención y el intervalo de despertar, que se utilizan para determinar cuándo y con qué frecuencia una estación despierta para realizar transmisiones en el enlace descendente o en el enlace ascendente. Para las estaciones de TIM, además de los mecanismos de acceso existentes basados en la contención del canal, por ejemplo, Canal de Acceso Distribuido Mejorado (EDCA), 802.11ah ha centrado sus esfuerzos en la definición de un nuevo tipo de mecanismo de acceso al canal libre de contención, que está motivado por el aumento del nivel de contención y la gravedad de los problemas de terminales ocultos debido al aumento del número de estaciones que participan en una red [23].

El estándar IEEE 802.11ah introduce el concepto de *Restricted Access Window (RAW)*, para reducir aún más el consumo de energía aumentando el tiempo en estado de *sleep* del nodo, así como para reducir las colisiones y las interferencias, aumentando consecuentemente el rendimiento. Un RAW reserva un período de tiempo dividido en ranuras o *slots* para un grupo específico de nodos. Las ranuras dentro de un RAW son igualmente largas, y los nodos asignados a un RAW se dividen uniformemente entre las ranuras mediante la asignación de operación por turnos. Un AP puede indicar a una estación de TIM un intervalo de tiempo durante el cual se permite a la estación transmitir o recibir paquetes.

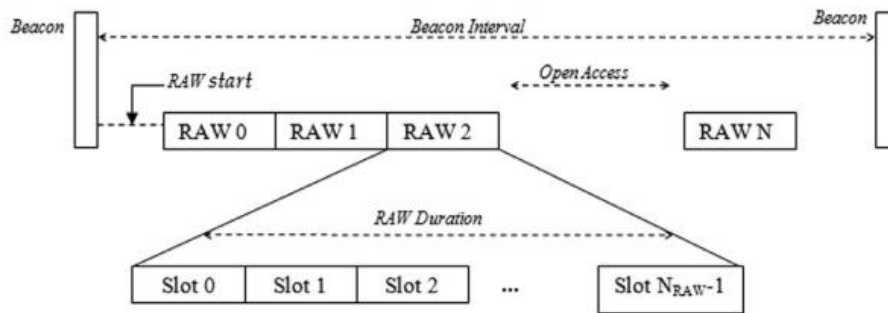


Figura 11 Esquema del mecanismo RAW [26].

Los nodos emplean un método de acceso aleatorio, (EDCA)/ (DCF), para acceder al medio en su ranura asignada y no competirán por el medio en ninguna otra ranura de ese RAW. Otros nodos que no fueron asignados al RAW no pueden competir por el medio durante ese RAW. De acuerdo con la configuración del RAW, los nodos pueden o no cruzar el límite de su ranura asignada para finalizar una transmisión en curso. La configuración para cada RAW en cada intervalo de *Beacon* se codifica en un conjunto de parámetros que se transmite a todos los nodos en un mensaje *Beacon*. La duración del RAW está definida por *Slot Duration Count C*, y de acuerdo con el estándar 802.11ah, la duración de las ranuras en cada RAW está definida por la siguiente expresión.

$$T_{slot} = 500\mu S + C * 120\mu S \quad (5)$$

La duración de todo el RAW se calcularía entonces como el número de ranuras dentro del RAW multiplicado por la duración de la ranura. La mínima y la máxima duración de la ranura está determinada por C, el cual es un entero no negativo, el cual tiene una longitud de 11 u 8 bits, dependiendo de si el formato de la ranura está en 1 ó 0, respectivamente. Aparte de los parámetros mencionados que definen al RAW, es importante mencionar *START AID* y *End AID* que indican

el número de nodos asignados a cada RAW, por lo tanto, solo se pueden asignar nodos con AID consecutivos al mismo RAW.

## Capítulo 4 experimentos

### 4.1 Simulador NS-3

NS (*Network Simulator*) es un simulador de redes basado en eventos discretos, el cual se usa principalmente en ambientes educativos y de investigación. Permite simular tanto protocolos *unicast* como *multicast*, y se utiliza intensamente en la investigación de redes móviles ad-hoc. NS-3 implementa una amplia gama de protocolos tanto de redes cableadas como de redes inalámbricas. La versión actual, ns-3, está diseñada para soportar todo el flujo de la simulación desde la configuración hasta la recolección y análisis de tramas. NS es de software libre, se ofrece bajo la versión 2 de la GNU *General Public License*. NS cuenta con dos versiones ns-2 y ns-3 que en general son incompatibles [27].

### 4.2. Módulo 802.11ah del simulador NS-3

Esta implementación se basa en las características del estándar 802.11 existentes en NS-3 y las extiende con un modelo de capa física para comunicaciones de radio sub-1Ghz y un subconjunto de las nuevas características de capa MAC del estándar. La implementación es modular, lo que permite que se amplíe fácilmente con características específicas del estándar 802.11ah. Este módulo fue implementado por [28] del Centro Interuniversitario de Microelectrónica (IMEC) de Bélgica y se añadieron cuatro componentes principales que amplían las características del simulador para hacerlo más cercano a las ya vistas del estándar. Estos componentes son:

- 1- *Wi-Fi Channel*: Una aproximación del medio físico sobre el que se transmiten los datos, incluido el modelo de pérdida de propagación y el modelo de retraso. El modelo de pérdida de propagación caracteriza la pérdida de fuerza de la señal durante la transmisión por aire. El modelo de retardo de propagación describe el retardo de transmisión entre dos nodos.
- 2- *Wi-Fi Phy layer*: Es la parte donde se define el formato de trama que se envían y se reciben a través del canal WiFi.
- 3- *Mac Low layer*: Aquí está implementado las funciones de EDCA y DCF, parte de las ventanas RAW y control de velocidad.
- 4- *Mac High layer*: Implementa funciones como la generación de *Beacons*, sensado, asociación y parte de las ventanas RAW.

El protocolo 802.11ah introduce el concepto de RAW (*Restricted Access Window*) que restringe el número de dispositivos que compiten por el acceso al medio simultáneamente. Básicamente, los dispositivos son divididos en grupos RAW y cada grupo tiene una ventana de acceso, dividido en ranuras o *slots*. Específicamente, el *Access point* (AP) con 802.11ah envía beacons que contienen los parámetros de cada RAW en curso. Este concepto ha sido implementado en el simulador NS-3 por medio de un archivo de configuración (.txt) en donde los siguientes parámetros pueden ser modificados de acuerdo con las características deseadas:

- *RawControl*: Especifica que si el grupo RAW puede ser accedido por cualquier estación o sólo las estaciones paginadas dentro del grupo RAW.
- *CrossSlotBoundary*: Especifica si las STA tienen permitido transmitir después del límite de *slot* asignado.



- *SlotFormat*: Formato del contador de *slot* RAW
- *NrawSlotCount*: Usado para calcular la duración del *slot* RAW.
- *NrawSlotNum*: Número de *slots* por grupo RAW.
- *Page*: Índice de page del subconjunto de AID.
- *Aidstart*: Estación con el menor AID alojado en el RAW.
- *Aidend*: Estación con el mayor AID alojado en el RAW

Estos, entre otros parámetros, pueden ser modificados como la modulación, tasa de transmisión, tipo de tráfico.

Para fines del presente trabajo el simulador tuvo que ser modificado en algunos parámetros para que se acercara más a los requerimientos de nuestros experimentos, así como modificaciones para que arrojara las trazas adecuadas para su posterior análisis estadístico.

En la Tabla 6 se describe el objetivo de cada experimento realizado, así como un resumen de este.

### 4.3 Experimentos realizados

Experimento	Objetivo	Resumen
1	Estudiar el impacto de EDCA y RTS/CTS en un solo RAW	En el simulador se configuraron dos nodos, cada uno con tráfico distinto y separados de 200 a 500 metros del AP. Se estudió el impacto de habilitar o no RTS/CTS.
2	Analizar el impacto en el <i>Throughput</i> al agrupar a los nodos de la red en RAW que tienen un solo <i>slot</i> .	Se configuró una red de 300 nodos con tráfico en saturación, los cuales fueron agrupados en 1, 5 y 10 RAW. En este caso solo hay tráfico de tipo BE.
3	Analizar el impacto en el <i>Throughput</i> al agrupar varios nodos con EDCA en RAW que tienen un solo <i>slot</i> .	El experimento consistió en una red de 110 nodos, de los cuales 75 tenían tráfico tipo BE, 30 nodos con tráfico tipo VO y 5 con tráfico tipo VI, agrupados en 1, 5 y 10 RAW. Cada RAW contenía solo un <i>slot</i>
4	Analizar los efectos de subdividir 1 RAW en <i>slots</i> . Analizar la relación que hay entre el número de estaciones y el número de <i>slots</i> .	Se simularon redes con 8, 16, 32, 64, 128, 256 y 512 nodos desplegadas en un área circular uniforme con radio de 300 m, distribuidas en un solo RAW con 1, 2, 4, 8, 16, 32 y 63 <i>slots</i> .  Se realizaron experimentos donde la suma del tráfico generado era el 20 y 100 por ciento de la capacidad del canal.
5	Estudiar el porcentaje de utilización del canal de transmisiones exitosas,	En este experimento se configuraron dos redes de 32 y 128 nodos cada una con intensidad de

	ACKs y colisiones al variar el número de <i>slots</i> . Solo se considera un RAW con 1, 8 y 63 <i>slots</i> .	tráfico generado del 20% y 100% de saturación del canal, además el RAW se dividido en 1, 8 y 63 <i>slots</i> .
6	Estudiar el impacto de subdividir los nodos en varios RAW, y subdividir cada RAW en varios <i>slots</i> . Comparar el resultado de este experimento ( <i>Throughput</i> ) con el obtenido en el experimento número 3 donde solo había un <i>slot</i> por cada RAW.	Para este experimento se configuró la misma red que para el experimento 3, pero la configuración de los RAW fue cambiada para tener 1, 5 y 10 RAW, y cada RAW fue dividido en 63, 22 y 11 <i>slots</i> , respectivamente.

**Tabla 6 Experimentos realizados.**

Los parámetros de simulación generales utilizados en todos los experimentos, y los parámetros físicos configurados para los nodos en las simulaciones son presentados en la Tabla 7.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<i>Frequency</i>	900 MHz
<i>Tx Power Start to End</i>	30 dBi
<i>Tx and Rx Gain</i>	3 dBm
<i>Noise figure</i>	6.8 dB
<i>Propag. Loss Model</i>	Log Distance
<i>Exponent</i>	3.76
<i>Ref. Loss</i>	8.0 dB
<i>Ref. Distance</i>	1
<i>Error Rate model</i>	YansErrorRate
<i>Simulation time</i>	100 s
<i>Seed</i>	1-10
<i>Data mode</i>	MCS2_2
<i>Data Rate</i>	1.95 Mbps

**Tabla 7 Parámetros generales de simulación.**

## Experimento 1

Para este experimento se configuró un escenario con dos nodos, uno del lado derecho del AP y otro al lado izquierdo, como se muestra en la Figura 12. Asimismo, se les asignó a los nodos distintos tipos de tráfico con su respectiva prioridad (ver Tabla 9). Además, los parámetros de simulación utilizados en los experimentos, las propiedades del RAW, los parámetros físicos usados configurados para los nodos en la simulación son presentados en la Tabla 8.

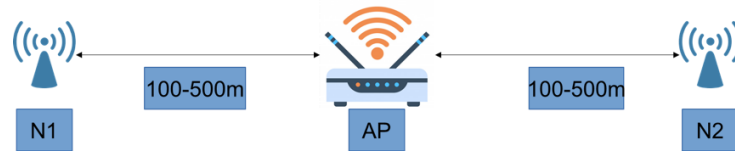


Figura 12 Escenario 1.

El experimento consistió en ir separando los nodos del AP, iniciando con 100 m y hasta alcanzar los 500 m. El experimento fue repetido varias veces para cada escenario, y en todos los experimentos se habilitó y deshabilitó el RTC/CTS.

Parámetro	Valor	Parámetro RAW	Valor
Radio	100-500 m	RAW Control	1
<i>Data Generation</i>	1000 packets/s	CSB	1
<i>Payload</i>	100 Bytes	SF	1
		SDC	200
		RSN	1
		Page	0

Tabla 8 Parámetros de simulación.

En la Tabla 9 se muestra el comportamiento de la transmisión y recepción de paquetes de los dos nodos hacia el AP considerando las diferentes prioridades de EDCA ver Tabla 9.

Nodo 1 vs Nodo 2	Referencia
BK vs BE	Primer renglón Figura 13
BK vs VI	Segundo renglón Figura 13
BK vs VO	Tercer renglón Figura 13
BE vs VI	Primer renglón Figura 14
BE vs VO	Segundo renglón Figura 14
VI vs VO	Tercer renglón Figura 14

Tabla 9 Tráfico asignado a cada nodo.

**BK vs BE (Primer renglón Figura 13).** Se muestra del lado izquierdo el número de paquetes transmitidos y recibidos (con y sin RTS-CTS) para el nodo con tráfico BK, mientras que del lado derecho se muestra lo mismo, pero del nodo con tráfico BE. En ambas figuras se distingue el número de paquetes transmitidos por cada nodo, y el número de esos paquetes que fueron recibidos correctamente por el AP con y sin RTS-CTS. El comportamiento de BE, al ser de mayor prioridad, tiene más oportunidades de transmitir que BK lo cual se traduce en un mayor número de paquetes transmitidos y recibidos. Mientras que BE transmite alrededor de 13000 paquetes, BK, por otro lado, transmite poco menos de 6000 paquetes. En este experimento se observa también que, a partir de los 300 metros, el nodo con tráfico BK comienza a transmitir un mayor número de

paquetes cuando no usa el mecanismo RTS-CTS, aunque también muchos de esos paquetes no se reciben correctamente por el AP (este comportamiento no se observa cuando se usa RTS-CTS). Claramente, a partir de 300 metros los nodos no se sienten entre ellos, lo cual favorece la presencia de terminales ocultas y la pérdida de paquetes. Ambas gráficas muestran claramente el impacto positivo de usar RTS-CTS, lo cual se observa por la poca diferencia entre el número de paquetes transmitidos y recibidos para todos los experimentos.

**BK vs VI (Segundo renglón en Figura 13).** En estos experimentos se puso a competir a un nodo de lado izquierdo con tráfico BK contra un nodo con tráfico VI de lado derecho. Cómo se puede observar en ambas gráficas, el comportamiento del nodo con video es muy similar al observado en la gráfica de la derecha del primer renglón (BE). Sin embargo, lo más notable en estas figuras es que ahora el nodo con tráfico BK transmite muy pocos paquetes para distancias iguales o inferiores a los 300 metros del AP, y aun cuando transmite muchos paquetes para distancias mayores a 300 metros, prácticamente ninguno se recibe correctamente en el AP. A distancias iguales o inferiores a los 300 metros el nodo BK transmite muy pocos paquetes por la mayor prioridad de acceso al canal que tiene el nodo con Video. Sin embargo, a partir de 300 metros el nodo con tráfico BK deja de sentir al otro nodo y, aunque transmite muchos paquetes cuando no utiliza RTS-CTS, casi todos sus paquetes colisionan con paquetes del nodo con tráfico VI. El uso del RTS-CTS alivia bastante este comportamiento.

**BK vs VO (Tercer renglón en Figura 13).** En estos experimentos se puso a competir a un nodo de lado izquierdo con tráfico BK contra un nodo con tráfico VO de lado derecho. El comportamiento general de estas gráficas es muy similar al observado en las gráficas del segundo renglón. Sin embargo, lo más notable en estas figuras es que ahora el nodo con tráfico BK prácticamente no puede transmitir a distancias iguales o inferiores a los 300 metros y, aunque transmite muchos paquetes para distancias mayores, casi ninguno de ellos se recibe correctamente en el AP. A distancias iguales o inferiores a los 300 metros, el nodo BK no puede transmitir debido a la mayor prioridad de acceso al canal que tiene el nodo con Voz. A partir de 300 metros el nodo con tráfico BK deja de sentir al otro nodo y, aunque transmite muchos paquetes cuando no utiliza RTS-CTS, casi todos colisionan con paquetes de tráfico VI. El uso del RTS-CTS evita de manera contundente este comportamiento.

**BE vs VI (Primer renglón en Figura 14).** En estos experimentos se puso a competir a un nodo de lado izquierdo con tráfico BE contra un nodo con tráfico VI de lado derecho. El comportamiento general de estas dos gráficas es similar al observado en las gráficas del segundo renglón de la Figura 13 que tienen en común que el nodo del lado derecho tiene tráfico VI. LA diferencia más notable es que el tráfico que logra transmitir y recibir el nodo BE en el cuarto renglón es superior al mostrado por tráfico BK en el segundo renglón. Esta diferencia se debe principalmente la mayor prioridad de acceso al canal que tiene VI (Primer renglón en Figura 14) con respecto a BK (Segundo renglón en Figura 13).

**BE vs VO (Segundo renglón en Figura 14).** En estos experimentos se puso a competir a un nodo de lado izquierdo con tráfico BE contra un nodo con tráfico VO de lado derecho. Nuevamente el comportamiento general de estas dos gráficas es similar al observado en las gráficas del tercer renglón de la Figura 13 que tienen en común que el nodo del lado derecho tiene tráfico VO. LA diferencia más notable es que el tráfico que logra transmitir y recibir el nodo BE en el cuarto renglón es superior al mostrado por tráfico BK en el segundo renglón. Esta diferencia se debe principalmente la mayor prioridad de acceso al canal que tiene VI (Primer renglón en Figura 14)

con respecto a BK (Segundo renglón en Figura 13). Lo más notable entre las gráficas de los dos renglones que, mientras el nodo con tráfico BK no puede transmitir para distancias iguales o menores a los 300 metros (Segundo renglón en Figura 13), el nodo con tráfico BE logra transmitir paquetes, aunque en un número inferior a los que transmite el nodo con tráfico VO que tiene la prioridad más alta de acceder al canal.

**VI vs VO (Tercer renglón en Figura 14).** En estos experimentos se puso a competir a un nodo del lado izquierdo con tráfico VI contra un nodo con tráfico VO del lado derecho. Comparando el comportamiento de este renglón con los renglones tercero y quinto (que tienen en común que el nodo del lado derecho tiene tráfico VO), se observa que el nodo con tráfico VI obtiene un mejor desempeño que los nodos con tráfico BK (Tercer renglón en Figura 13) y BE (Segundo renglón en Figura 14). Esto se debe nuevamente a la mayor prioridad de acceso al canal que tiene tráfico VI comparado con BK y BE.

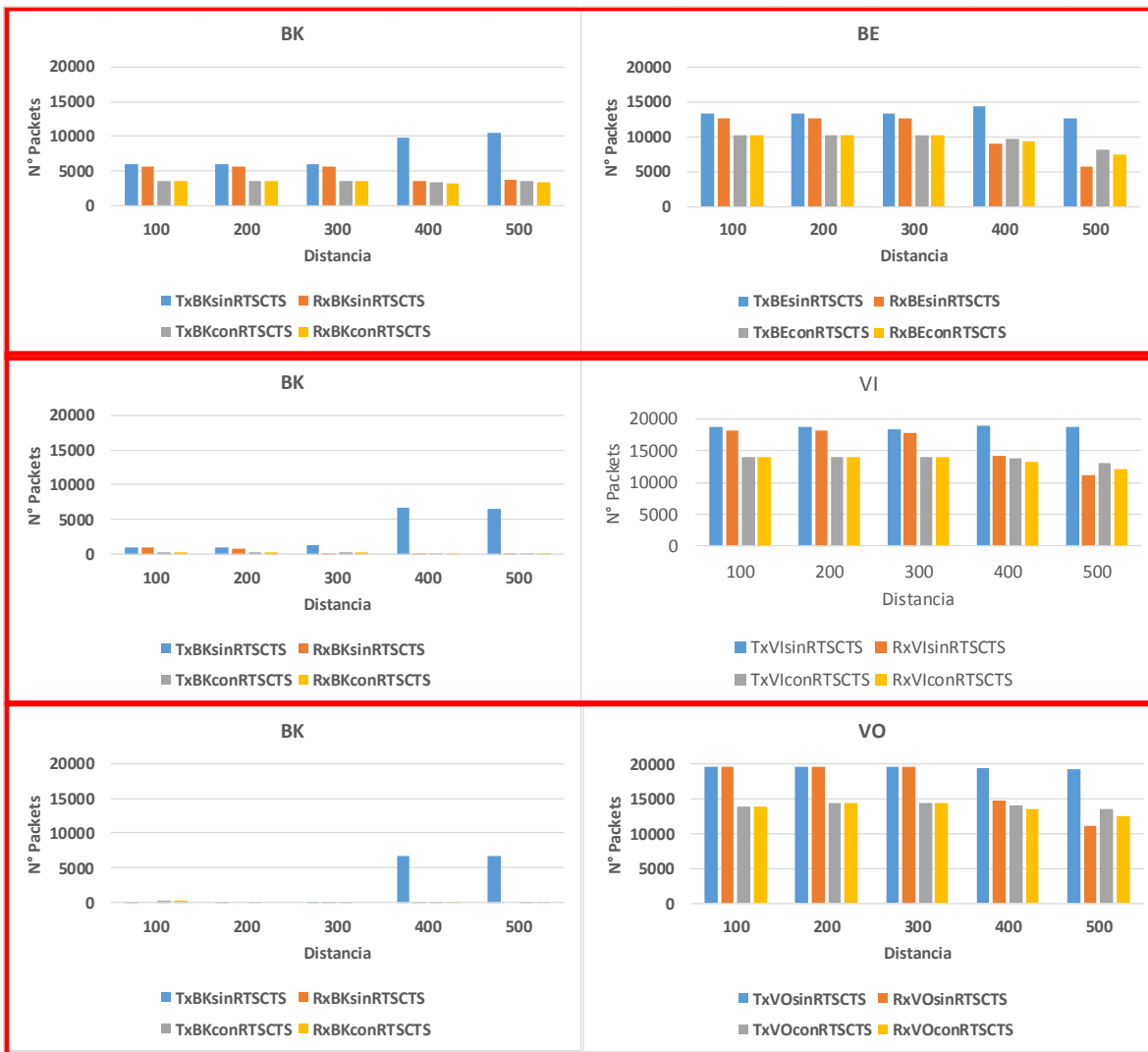


Figura 13 Paquetes transmitidos y recibidos para los distintos tipos de tráfico.

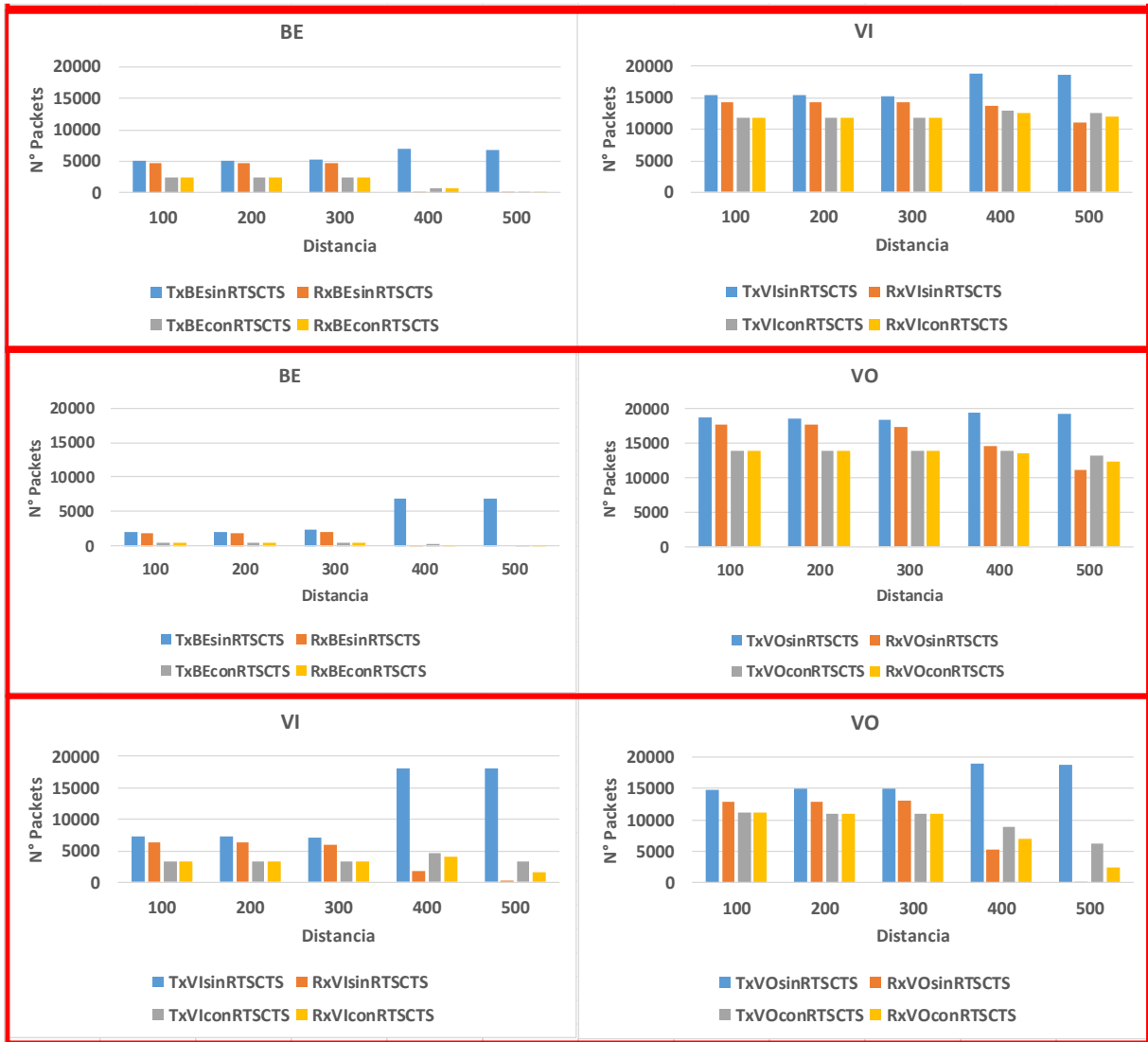


Figura 14 Paquetes transmitidos y recibidos para los distintos tipos de tráfico.

## Experimento 2

En este experimento se configuró una red con 300 nodos distribuidos de manera uniforme dentro de un círculo con radio de 300 m (ver Figura 15). Cada nodo fue configurado para generar tráfico en saturación de tipo BE. Además, los nodos fueron agrupados en 1, 5 y 10 RAW, por lo que para el primer caso el RAW contenía a los 300 nodos, en el segundo contenía 60 nodos, y en el tercer caso contenía 30 nodos. También hay que destacar que cada RAW estaba conformado por solo un *slot*.

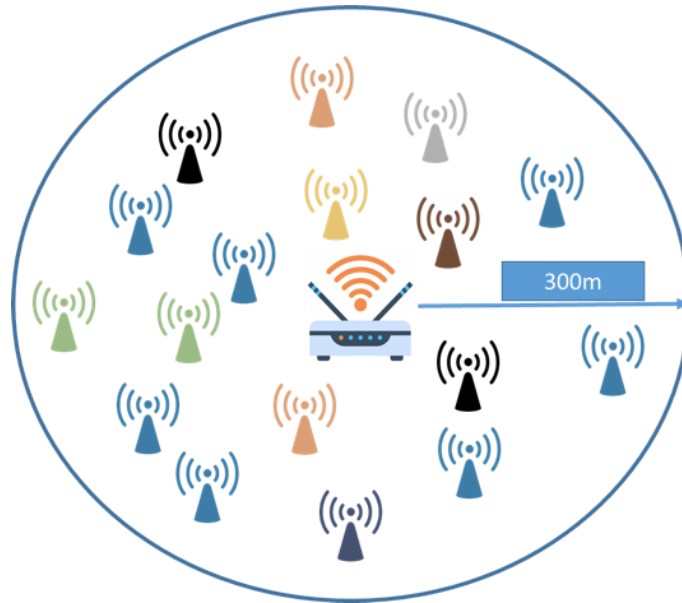


Figura 15 Escenario experimento 2.

Los parámetros de simulación, así como la configuración del RAW se muestran a continuación en la Tabla 10. Para este experimento también se activó y desactivó el mecanismo RTS/CTS.

Parámetro RAW	Valor
NRAW	1, 5 y 10
RAW	0
CSB	0
SF	0
SDC	2047
RSN	1
Page	0
Radio	300 m
Data Generation	1000 pack/seg
Payload	100 Bytes

Tabla 10 Parámetros de simulación experimento 2.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este experimento (ver Figura 16), podemos decir que el efecto de agrupar a los nodos en RAW resulta ser positivo, ya que el *throughput* agregado de la red se incrementa. Si se compara el desempeño de la red cuando solo tiene un RAW con la red cuando está dividida en 5 y 10 RAW, el incremento es del 26.4% y 34.4%, respectivamente. Del mismo modo, si se compara la red cuando tiene 5 RAW con la red dividida en 10 RAW, el incremento en la eficiencia es del 6.3%. Este aumento en el *throughput* de la red se debe a que, al reducir la cantidad de nodos contenidos por cada RAW, hay una menor contención y un menor número de colisiones. Otro punto destacable en la Figura 16 es la reducción del *throughput* al activar el mecanismo RTS/CTS debido al *overhead* que dicho mecanismo ocasiona (recordar que con estas dimensiones de la red no hay problemas de terminal oculta).

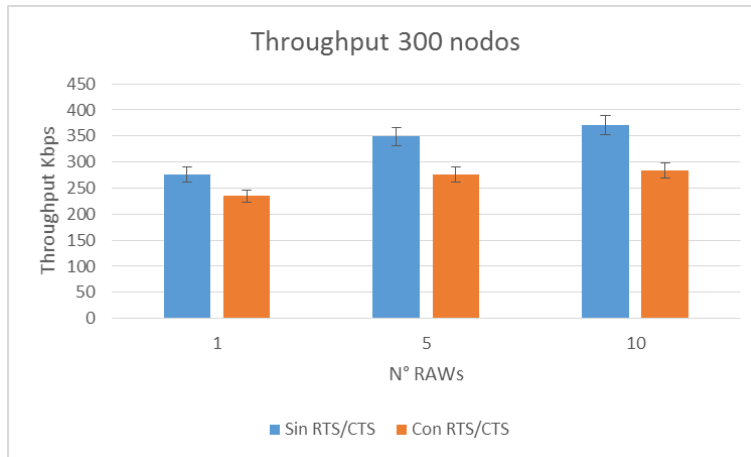


Figura 16 *Throughput* de la red al agrupar los nodos.

En la Figura 17 observamos Rx vs Tx, es decir, la cantidad de paquetes recibidos correctamente por el AP contra los paquetes transmitidos por los nodos, y se observa que el efecto de agrupar a los nodos en RAW con un número menor de nodos por RAW ayuda a evitar colisiones, aumentando la eficiencia de la red. Sin embargo, la cantidad de paquetes perdidos sigue siendo significativa, incluso cuando los nodos están agrupados en 10 RAW. Por otro lado, la pérdida de paquetes es casi nula cuando se activa el mecanismo RTS/CTS, pero como se ve en la Figura 17 el *Throughput* se ve severamente afectado cuando dicho mecanismo se activa. Esto significa que la ventaja de RTS/CTS en este experimento está en el ahorro de energía debido a que evita que los nodos transmitan a ciegas, evitando un gran número de colisiones ocasionadas por terminales ocultas.

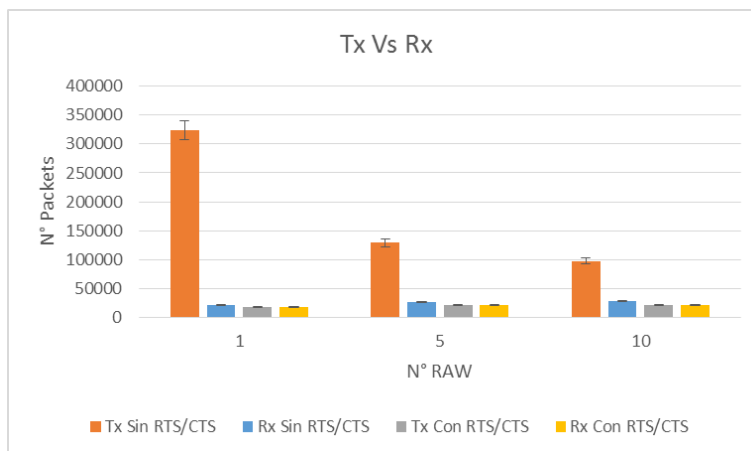


Figura 17 Paquetes transmitidos VS paquetes recibidos.

### Experimento 3

En este experimento se configuró una red de 110 nodos con distintos tipos de tráfico: 75 nodos con tráfico BE simulando sensores, 30 nodos con tráfico de voz (VO) y 5 nodos con tráfico de tipo video (VI). Nuevamente los nodos fueron agrupados en 1, 5 y 10 RAW con un solo *slot* en



cada RAW. En cuanto a la distribución geográfica de los nodos, esta fue realizada de manera uniforme dentro de un círculo de radio 300 m como se muestra en Figura 18.

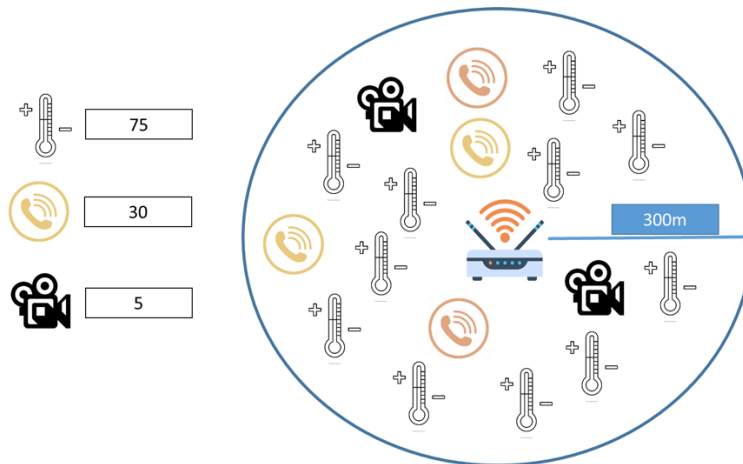


Figura 18 Escenario experimento 3.

Las características que se utilizaron para cada tipo de tráfico se muestran a continuación en la Tabla 11. También hay que mencionar que la distribución de los nodos queda de la siguiente manera: para el caso de un solo RAW quedan contenidos los 110 nodos, para el caso de 5 RAW quedan 22 nodos en cada RAW, y para el caso de 10 RAW quedan contenidos 11 nodos por cada RAW.

Tipo de tráfico	Tamaño de paquete en bits	Tasa de generación de paquetes paquetes/s
BE	100 [29]	1
VI	1500 [30]	10
VO	20 [31]	50

Tabla 11 Características de tráfico.

Los parámetros de simulación son similares a los del experimento 2, con la diferencia de que ahora la intensidad de tráfico se calculó para que ésta no sature el canal. Para esto se tomó en cuenta las características de cada tipo de tráfico vistos en la Tabla 12 y la capacidad de transmisión del canal. El resultado del cálculo para cada tipo de tráfico es el siguiente.

#### Tráfico generado sin considerar *headers*

- 75 nodos con BE con tasa de 1 paquete de 100 bytes por segundo  

$$75 * 100 * 1 = 7500 \text{ bytes/s}$$
- 30 nodos con VO con tasa de 50 paquetes de 20 bytes por segundo  

$$30 * 50 * 20 = 30000 \text{ bytes/s}$$
- 5 nodos con VI con tasa de 10 paquetes de 1500 bytes por segundo  

$$5 * 1500 * 10 = 75000 \text{ bytes/s}$$

- La suma total de tráfico generado es  

$$30000 + 7500 + 75000 = 112500 \frac{\text{bytes}}{\text{s}} * 8 = 0.9\text{Mbps}$$

- La tasa de transmisión del canal es 1.9Mbps.

$$0.9\text{Mbps} < 1.9\text{Mbps}$$

**Por lo tanto, tenemos un 47.36% de uso del canal**

**Tráfico generado considerando headers.**

- 75 nodos con BE con tasa de 1 paquete de 100 bytes por segundo

$$75 * 166 * 1 = 12450 \text{ bytes/s}$$

- 30 nodos con VO con tasa de 50 paquetes de 20 bytes por segundo

$$30 * 50 * 86 = 129000 \text{ bytes/s}$$

- 5 nodos con VI con tasa de 10 paquetes de 1500 bytes por segundo

$$5 * 1566 * 10 = 78300 \text{ bytes/s}$$

- La suma total de tráfico generado es

$$12450 + 129000 + 78300 = 219750 \frac{\text{bytes}}{\text{s}} * 8 = 1.758\text{Mbps}$$

- La tasa de transmisión del canal es 1.9Mbps.

$$1.758\text{Mbps} < 1.9\text{Mbps}$$

**Por lo tanto tenemos un 92.52% de uso del canal.**

Antes de pasar a los resultados, cabe señalar, que la distribución de los nodos se hizo de manera aleatoria, es decir, que cada RAW tuvo nodos con diferentes tipos de tráfico.

<b>Parámetro RAW</b>	<b>Valor</b>
NRAW	1, 5 y 10
RAW	0
CSB	0
SF	0
SDC	20
RSN	110, 22 ,11
Page	0
Radio	300 m
Data Generation	VO, VI, BE
Payload	20, 100 y 1500 Bytes

**Tabla 12 Parámetros RAW y de simulación.**

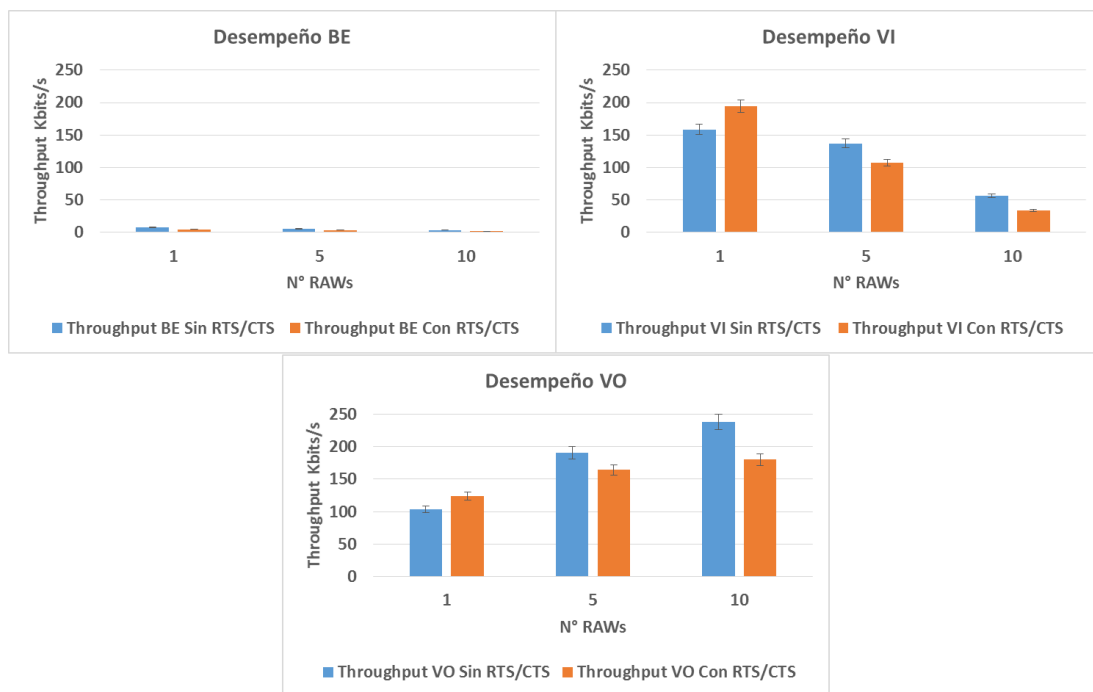
En la Figura 19 se muestran los resultados obtenidos de *throughput* por tipo de tráfico. Lo primero que resalta en esta Figura es el nulo *throughput* que obtiene tráfico BE para cualquier número de RAW, a pesar de tener el mayor número de nodos en los experimentos. Por otro lado, es interesante ver como a medida que se incrementa el *throughput* de tráfico VO, disminuye el

*throughput* de tráfico VI. Asimismo, en la Figura 20 observamos que tanto el tráfico de BE como de VI pierden oportunidades para transmitir conforme los grupos RAW contienen menos nodos (mayor número de RAW), mientras que para el tráfico de tipo VO el efecto es el opuesto.

El hecho de que el tráfico de tipo VO tenga mejor desempeño sobre VI y BE, puede explicarse por dos razones:

- Como ya se vio en el experimento anterior, la acción de agrupar a los nodos en varios RAW reduce la contención dentro de cada RAW, por lo que cada nodo tiene mejores condiciones para transmitir.
- Cada tipo de tráfico cuenta con una prioridad diferente de acceder al canal. En este caso tráfico de tipo VO tiene la mayor prioridad para transmitir que los demás.

Finalmente, activar el mecanismo RTS/CTS muestra un impacto positivo en la eficiencia de tráfico VI y VO, aunque esto ocurre cuando solo hay un RAW. Cuando el número de RAW se incrementa, el impacto general de activar el mecanismo RTS-CTS resulta contraproducente. Algo interesante es que a pesar de que la cantidad de paquetes transmitidos por VI es menor a los transmitidos por VO, tráfico VI tiene mayor *Throughput* que VO (Figura 19). Lo anterior ocurre debido al tamaño de los paquetes, ya que mientras para VO los paquetes son de 20 bytes, los paquetes de VI tienen 1500bytes.



**Figura 19 Desempeño por tipo de tráfico.**

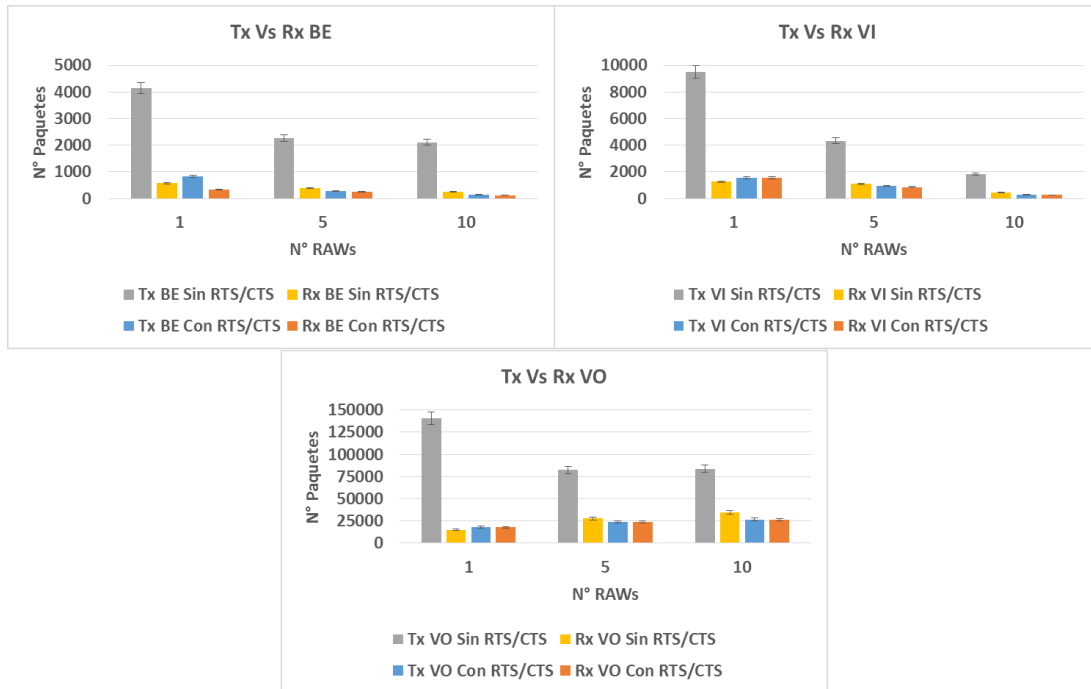


Figura 20 Rx vs Tx por tipo de tráfico.

#### Experimento 4

En este experimento se configuró solo un RAW, el cual fue segmentado en varios *slots* hasta alcanzar el máximo permitido por el estándar. Dicha segmentación se realizó de acuerdo con la Tabla 14. Asimismo, la cantidad de nodos fue modificada de tal manera que se inició con ocho nodos en la red y hasta llegar a 512 nodos. Además, todos los nodos fueron configurados para que tuvieran el mismo tipo de tráfico, que en este caso fue de tipo BE. Los parámetros de simulación y del RAW son mostrados a continuación.

Parámetro RAW	Valor
RAW	0
CSB	0
SF	0
SDC	2047-60
RSN	1-63
Page	0
Radio	200 m
Data Generation	20-100% del canal
Payload	100 Bytes

Tabla 13 Parámetros de simulación experimento 4.

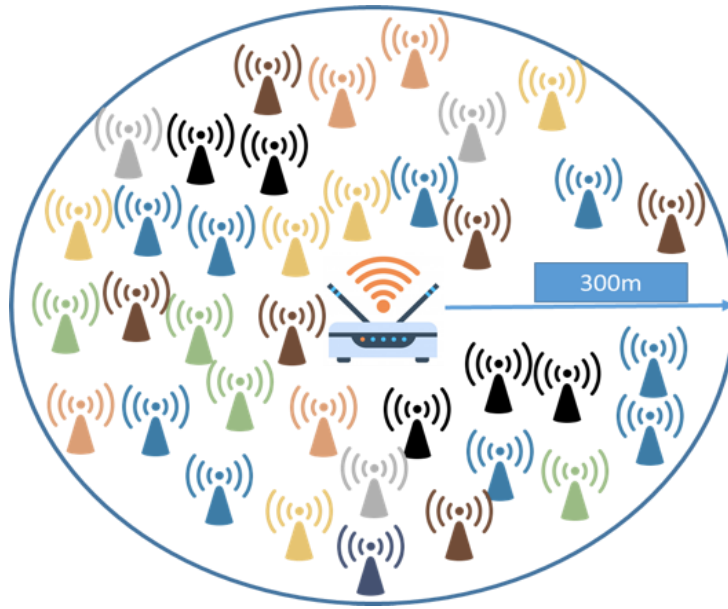


Figura 21 Escenario experimento 4.

N° de Nodos en experimento	N° Slots estudiados
32	1 slot, 2 slots, 4 slots, 8 slots, 16 slots, 32 slots y 63 slots
64	
128	
256	
512	

Tabla 14 Distribución de nodos en los slots de un único RAW.

Otra característica del experimento es que la intensidad de tráfico total de la red fue calculada para que esta ocupara el 20% y 100% de la capacidad del canal.

De acuerdo con los resultados obtenidos (Figura 22 y Figura 23), el comportamiento del *Throughput* presenta un valor máximo para un determinado número de *slots* (número de *slots* óptimo), y el desempeño de la red disminuye cuando el número de *slots* resulta menor o mayor al valor óptimo. Por otro lado, la relación Rx/Tx mejora a medida que el RAW es segmentado en un número mayor de *slots*, con excepción del último punto en la gráfica donde la eficiencia vuelve a bajar. Este comportamiento se debe a que por un lado incrementar el número de *slots* reduce la contención y mejora la eficiencia, pero por un lado aumenta el retardo entre dos paquetes del mismo nodo disminuyendo la misma eficiencia.

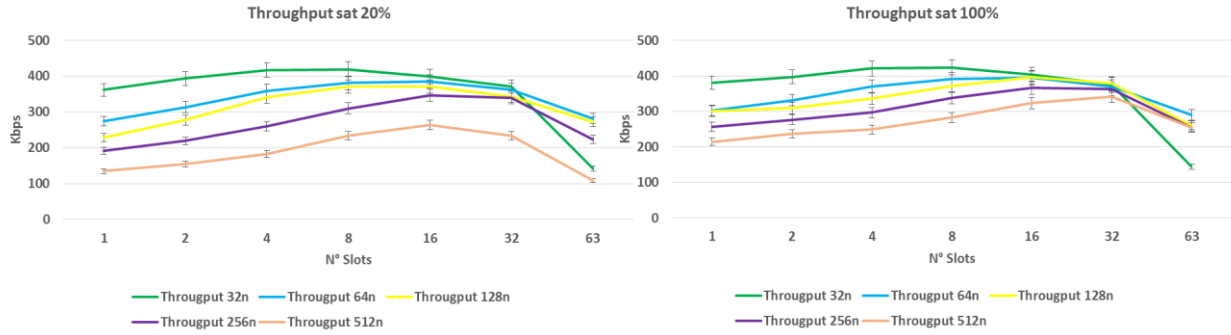


Figura 22 Throughput.

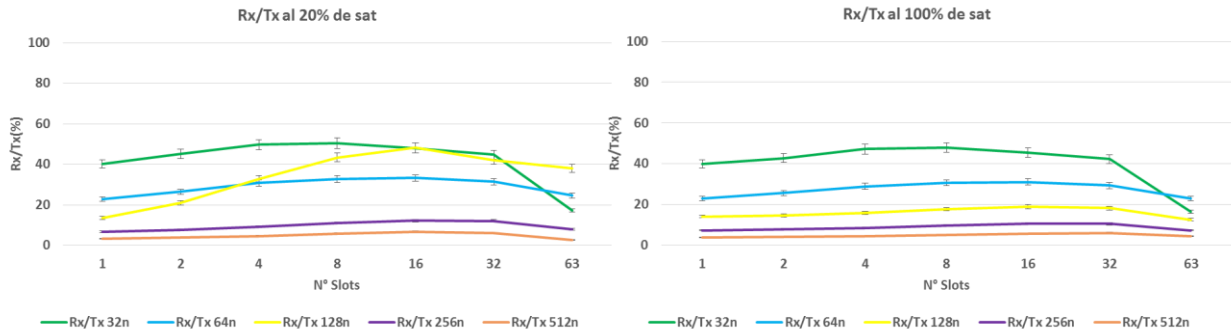


Figura 23 Relacion Rx/Tx.

## Experimento 5

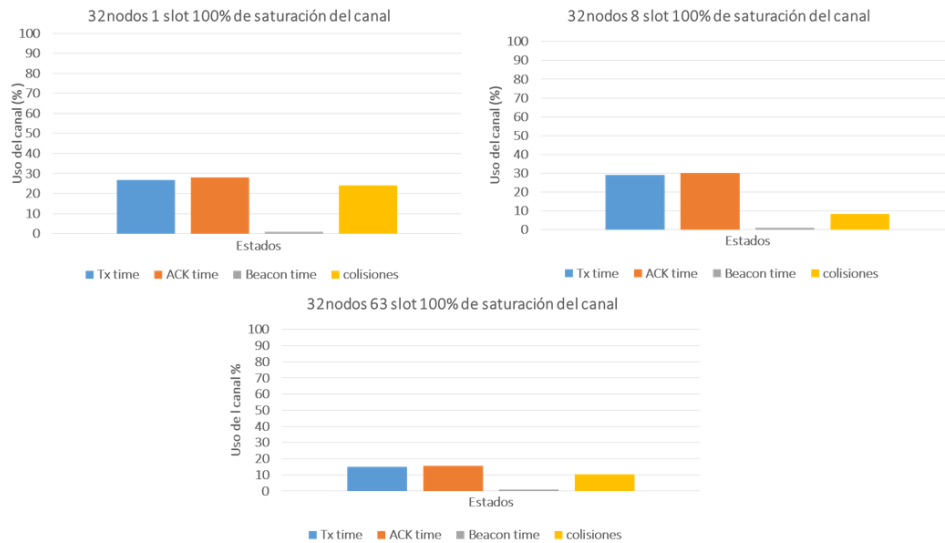
En este experimento se configuraron dos redes de 32 y 128 nodos cada una con intensidad de tráfico del 100% de saturación del canal. Además, el RAW se dividió en 1, 8 y 63 slots. Esto con el fin de estudiar qué porcentaje de uso de canal se debe a paquetes transmitidos correctamente, ACKs, Beacons y paquetes que colisionaron.

Parámetro RAW	Valor
RAW	0
CSB	0
SF	0
SDC	20
RSN	110, 22 ,11
Page	0
Radio	200 m
Data Generation	1.95 Mbps
Payload	100 Bytes

Tabla 15 Parámetros RAW y de simulación.

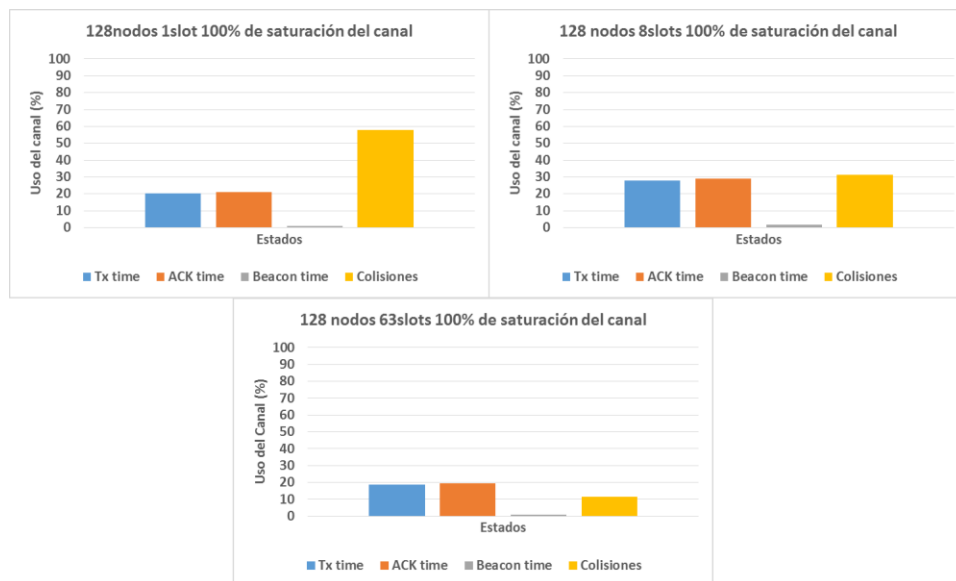
De acuerdo con los resultados obtenidos, para la red de 32 nodos y 100% de saturación del canal, la segmentación resulta ser efectiva para evitar colisiones como se puede notar en la Figura 24, donde sin segmentación, (es decir con un solo slot), ocupa más tiempo en colisiones. Por otro lado, dividir el RAW en ocho slots disminuye el número de colisiones y esto se puede ver como un ahorro significativo en el consumo de energía, porque las retransmisiones también disminuyen.

Al dividir el RAW en 63 *slots* el desempeño el uso del canal baja, y esto se debe a que ahora los nodos tienen que esperar más tiempo por los *slots* vacíos. Además de que las ranuras, al ser cortas, la probabilidad de colisionar aumenta, y el tiempo perdido en estas también.



**Figura 24** Porcentaje de uso del canal a 100% de saturación.

Los resultados para la red de 128 nodos (ver Figura 25) presentan un comportamiento similar al del escenario anterior. Por un lado, la red muestra tener menores colisiones con la segmentación del RAW y un mejor aprovechamiento del canal. Sin embargo, para 63 *slots* el aprovechamiento del canal disminuye; esto debido a que en cada *slot* solo podrán competir dos nodos mientras que los demás nodos estarán esperando su turno para competir, incrementando los tiempos de espera.



**Figura 25** Porcentaje de uso del canal a 100% de saturación.

## Experimento 6

En este experimento el escenario es parecido al del experimento 3, en donde el número de nodos se fijó en 110 de los cuales: 75 son sensores con tráfico tipo BE, 30 nodos con tráfico de voz y 5 nodos con tráfico de tipo video (ver Figura 26). Del mismo modo, los nodos fueron agrupados en 1, 5 y 10 RAW, y los parámetros de simulación también fueron repetidos. Sin embargo, se modificaron el número de *slots* (SN) y el contador de la duración del *slot* (SDC). Hay que recordar que en el experimento 3 cada RAW tenía solo un *slot*.

La cantidad de *slots* por RAW se estableció de la siguiente manera:

$$RSN = \begin{cases} n, & \text{si } n < 63 \\ 63, & \text{si } n \geq 63 \end{cases} \quad (6)$$

Donde n es el número de nodos que contiene cada RAW.

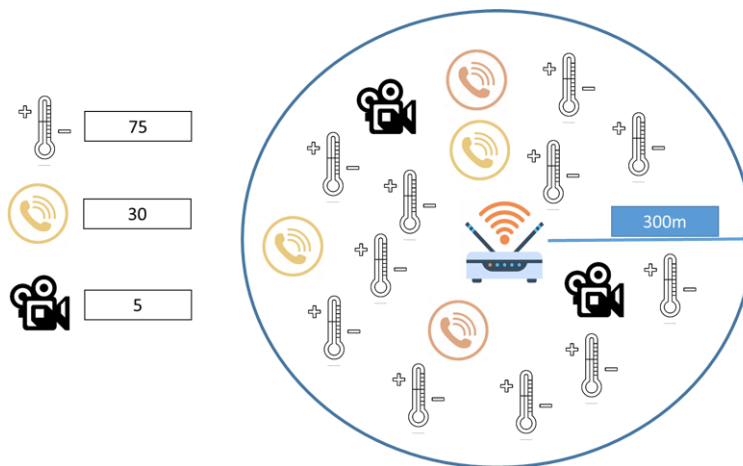


Figura 26 Escenario 4.

Es preciso señalar que el valor de CSB quedó en cero para evitar que los nodos transmitieran fuera de la ranura a la que fueron asignados. SDC se calculó en función del RSN. Adicionalmente, la intensidad de tráfico que se utilizó para este experimento fue la misma que la utilizada en el Experimento 3.

Parámetro RAW	Valor
NRAW	1, 5, 10
CSB	0
SF	0
SDC	2047, 182, 89
RSN	110, 22, 11
Page	0
Radio	300 m
Data Generation	BE, VI, VO
Payload	100, 1500 y 20 Bytes

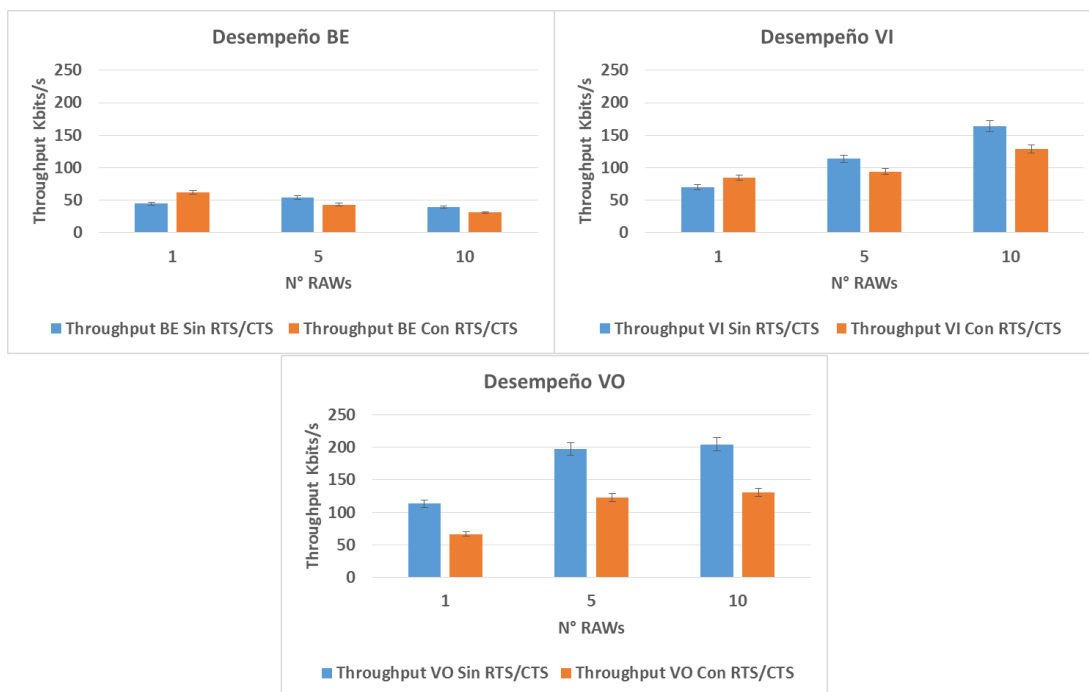
Tabla 16 Parámetros de simulación.



En la Figura 27, se observa que el desempeño de tráfico BE mejora con respecto al desempeño de tráfico BE visto en el Experimento 3. El desempeño de BE tiene su mejor rendimiento mejora cuando los nodos están agrupados en 5 RAW. Por otro lado, cuando el mecanismo RTS/CTS es activado el desempeño de BE baja a medida que los nodos son agrupados en más RAW.

Para el caso de VI, el desempeño mejora con el agrupamiento a diferencia de lo ocurrido en el Experimento 3, en donde ocurría lo contrario, es decir que, el *throughput* bajaba a medida que los nodos eran agrupados en más RAW. Lo anterior se debe a que ahora cada RAW es subdividido en varios *slots* que ayudan a reducir todavía más los tiempos de contención y las colisiones.

En el caso de VO observamos que, al igual que el experimento 3, el desempeño de la red mejora con el agrupamiento de los nodos en un mayor número de RAW. Por otro lado, debido al tamaño pequeño de los paquetes VI, el *overhead* del mecanismo RTS/CTS impacta negativamente el rendimiento de la red. Cabe mencionar que el desempeño de VO mejora comparado en el experimento 3 para 10 RAW debido a que ahora el RAW se subdivide en varios *slots*.



**Figura 27. Desempeño de la red por servicio.**

Finalmente, en la Figura 28 observamos que tanto el tráfico de VI como de VO pierden menos paquetes a diferencia de lo visto en el experimento 3, en donde el número de paquetes perdidos era significativa. Mientras que para el tráfico de BE ocurre lo contrario.

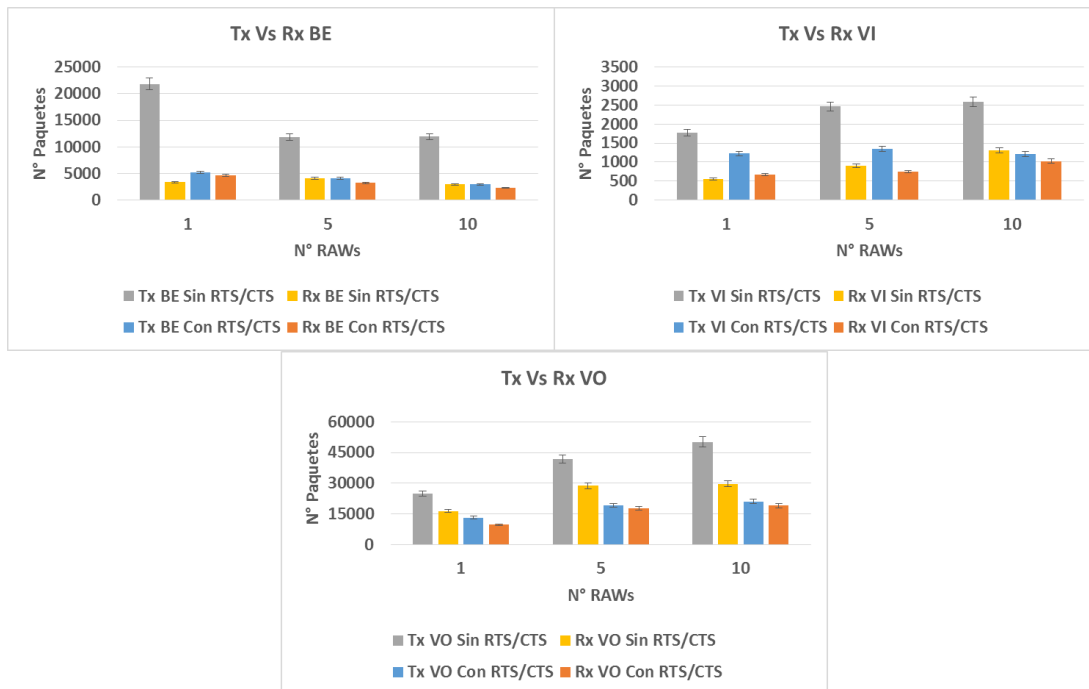


Figura 28 Paquetes recibidos con éxito por servicio.

#### 4.4. Discusión de los experimentos

A continuación, se presenta un breve resumen de los experimentos realizados y los hallazgos encontrados en cada uno.

Experimento	Objetivo	Discusión
1	Estudiar el impacto de EDCA y RTS/CTS en un solo RAW	<p>En este experimento se logró verificar que el mecanismo EDCA cumple plenamente con su objetivo de diferenciar la calidad de servicio que logran distintas clases de tráfico. Sin embargo, en ocasiones el mecanismo EDCA va demasiado lejos al prácticamente negar que nodos con tráfico BK transmitan en presencia de otro tipo de tráfico, en especial tráfico VO o VI. Una posible solución a este problema sería agrupar nodos con tráfico BK y BE en RAW donde no participen nodos con otro tipo de tráfico con mayor prioridad de acceso al canal.</p> <p>Por otro lado, el uso del mecanismo RTS-CTS muestra resultados opuestos. Del lado negativo, RTS-CTS reduce ligeramente el caudal de datos de tráficos de alta prioridad como VI y VO debido probablemente al <i>overhead</i> del propio mecanismo. Del lado positivo, RTS-CTS evita</p>

		que tráfico de baja prioridad como BK o BE sea transmitido, pero nunca llegue a su destino debido que las distancias involucradas generan colisiones con terminales ocultas.
2	Analizar el impacto en el <i>Throughput</i> al agrupar a los nodos de la red en RAW que tienen un solo <i>slot</i> .	<p>En este experimento se observa una mejora significativa en el desempeño de la red a medida que los nodos son agrupados en un mayor número de RAW. Lo anterior debido nuevamente a la menor contención que aparece en RAW con un número menor de nodos.</p> <p>Nuevamente, el efecto del mecanismo RTS/CTS resulta contradictorio. Del lado negativo reduce el caudal de datos al incrementarse el número de RAW, probablemente ocasionado por el <i>overhead</i> del mecanismo. Del lado positivo, reduce de manera dramática el número de colisiones ocasionadas por terminales ocultas en RAW con muchos nodos. Esto último resulta muy importante si el consumo de la batería es crítico, pues se evita el gasto energético de transmitir un paquete que tiene pocas posibilidades de llegar a su destino correctamente. Es importante recalcar que en este experimento solo habías tráfico BE.</p>
3	Analizar el desempeño al agrupar nodos de distinta prioridad (EDCA) en varios RAW que tienen un solo <i>slot</i> .	<p>A diferencia del experimento anterior donde todo el tráfico era del tipo BE, en este experimento se transmite tráfico BE, VI y VO. Nuevamente se observa el nulo caudal de datos que pueden transmitir nodos con tráfico BE para cualquier número de RAW. Este resultado vuelve a sugerir que es necesario aislar este tipo de tráfico de los demás para que nodos BE puedan transmitir algo de información.</p> <p>Por otro lado, el agrupar a los nodos en un número mayor de RAW perjudica a nodos VI pero beneficia a nodos VO. Al solo haber 5 nodos de VI en los experimentos, es posible que existan varios RAW donde nodos VO no compitan con nodos VI (sobre todo para 5 y 10 RAW), lo cual favorece todavía más el acceso al canal de nodos VO. Por otro lado, si por mala suerte dos de los nodos VI coinciden en el mismo</p>

		RAW, esto afecta negativamente su desempeño pues compiten entre ellos.
4	Analizar los efectos de subdividir los nodos en un RAW que tiene varios <i>slots</i> .	El efecto de dividir al RAW en <i>slots</i> mejora el desempeño de la red conforme se incrementa el número de <i>slots</i> hasta alcanzar un punto donde el desempeño empieza a decrecer. Por un lado, al incrementar el número de <i>slots</i> se reduce el número de nodos por <i>slot</i> , lo cual disminuye la contención mejorando el desempeño. Por otro lado, la división en varios <i>slots</i> también puede ser motivo de retrasos debido a que los nodos, al estar asignados a un <i>slot</i> en particular, tendrán que esperar a que llegue el inicio de este para poder transmitir y, de no concretarse la transmisión, tendrán que esperar nuevamente todo un ciclo del RAW para poder intentarlo nuevamente.
5	Estudiar la utilización del canal (transmisiones, recepciones, ACKs y colisiones) al variar el número de <i>slots</i> . Solo 1 RAW con 1, 8 y 63 <i>slots</i> .	Dividir el RAW en un mayor número de <i>slots</i> reduce de manera significativa el número de colisiones en el canal, lo cual deja libre el canal para la transmisión de paquetes que tienen una mayor probabilidad de ser recibidos correctamente. Sin embargo, subdividir al RAW en varios <i>slots</i> también significa que los nodos tendrán que esperar más tiempo para poder transmitir.
6	Comparar el rendimiento con el obtenido en el experimento número 3, para estudiar el impacto de subdividir a los RAW con <i>slots</i> .	En los experimentos 3 y 4 vimos que el efecto de agrupar a los nodos en varios RAW y en varios <i>slots</i> por RAW trae consigo una mejora en el rendimiento. Al combinar esta configuración, pero en presencia de tráfico con diferentes prioridades se observa que inclusive nodos con menor prioridad (BE) mejoren su desempeño (recordar que en el experimento 3 nodos BE prácticamente tenían cero caudales de datos. Dividir a los RAW en <i>slots</i> y asignar un <i>slot</i> por nodo permite aislar a cada nodo de los demás y permite que cada nodo transmita al menos un paquete en cada RAW. Por otro lado, esta división restringe a aquellos tipos de tráfico que requieren de un mayor flujo de información.

Tabla 17 Discusion de los experimentos.

## Capítulo 5 Conclusiones y trabajo a futuro

Cómo se mencionó al principio del presente trabajo de tesis, el despliegue de muchos nodos en grandes áreas es un reto muy grande que se está desarrollando el Internet de las Cosas (IoT). En este contexto, el estándar IEEE 802.11ah propone un nuevo mecanismo de contención (RAW) al nivel de capa MAC que mejora el desempeño de este tipo de redes. Este mecanismo consiste en dos niveles: el mecanismo de acceso RAW y la subdivisión de cada RAW en *Slots*.

En este trabajo evaluamos el impacto que tiene sobre una red con muchos nodos que tienen diferentes prioridades de tráfico al ser agrupados primero en RAW, y posteriormente subdividir cada RAW en *slots*. Finalmente, el presente trabajo considera también el impacto del mecanismo RTS/CTS sobre el desempeño general de la red.

Como resultado de los experimentos realizados se pudo verificar primero la efectividad del mecanismo EDCA para garantizar trato diferenciado de acceso al medio a diferentes tipos de tráfico. Sin embargo, también se pudo comprobar que dicho mecanismo puede llegar al extremo de negar acceso al canal para tipos de tráfico con baja prioridad como son tráfico BK o BE. En este sentido parece necesario agrupar a los nodos con baja prioridad para precisamente protegerlos de tipos de tráfico con mayor prioridad, aunque en el fondo esto sería ir en contra de los propios objetivos del mecanismo EDCA.

En general, el proceso de agrupar a los nodos en los RAW conlleva a una mejora en el desempeño de la red debido a la menor contención que tiene cada RAW al tener un número menor de nodos. Por otro lado, subdividir a cada RAW en *slots* en general mejora el desempeño de la red al evitar las colisiones y aumentar el número de transmisiones exitosas. Sin embargo, en aquellos casos donde la subdivisión se lleva al extremo de otorgar un *slot* por nodo resulta contraproducente pues incrementa de manera significativa el retardo entre paquetes que ve cada nodo, mermando el desempeño de la red.

Por lo que toca al mecanismo RTS/CTS en el impacto de la red este resulta contradictorio. Del lado negativo, se observa que reduce ligeramente el caudal de datos de la red ocasionado por el *overhead* del propio mecanismo cuando los paquetes a transmitir son de tamaño reducido (tráfico BK y BE). Del lado positivo, se observa que reduce de manera significativa el número de colisiones ocasionadas por terminales ocultas. Lo anterior se vuelve un aspecto crítico en nodos que operan con baterías pues evita que gasten energía en paquetes transmitidos que no llegan a su destino.

Finalmente, la configuración óptima de este tipo de redes es un asunto complejo que no tiene una solución sencilla o inmediata. En este sentido, como trabajo futuro se plantea el uso de técnicas de Aprendizaje de máquinas, como Redes Neuronales Artificiales (RNA), para ayudar a obtener los parámetros óptimos de operación de la red en lo que respecta al número de RAW y al número de *Slots* por RAW.

# Bibliografía

- [1] C. Alcocer, 16 Septiembre 2016. [En línea]. Available: <https://blog.telecom.pucp.edu.pe/index.php/2016/09/14/cual-es-la-diferencia-entre-los-estandares-ieee-802-11ah-y-802-11af/>.
- [2] L. Tian, S. Deronne, . S. Latré y . J. Famaey, «Implementation and validation of an IEEE 802.11ah module for NS-3,» 2016.
- [3] M. Z. Ali, J. Mišić y V. Misić, «Differentiated QoS to Heterogeneous IoT Nodes in IEEE 802.11ah RAW Mechanism,» Toronto, 2018.
- [4] S. Zumpano Arnosti y J. Freitag Borin, «Analyzing QoS metrics in IEEE 802.11ah networks with traffic differentiation,» Sao Paulo, 2019.
- [5] K. Jeongin y Y. Ikjun, «QoS Enhanced Channel Access in IEEE 802.11ah Networks,» 2017.
- [6] B. Domazetovic, E. Kocan y A. Mihovska, «Performance Evaluation of IEEE 802.11ah Systems».
- [7] R. Rom, Multiple Access Protocols, Springer-Verlag, 1989.
- [8] W. Tomasi, Sistemas de comunicaciones electrónicas, México: Pearson Educación, 2003.
- [9] M. D. K. Frank H. P. Fitzek, Cognitive Wireless Networks: Concepts, Methodologies and Visions Inspiring the Age of Enlightenment of Wireless Communications, Springer Science & Business Media, 2007.
- [10] J. Luque Ornoñez y H. José Manuel, Comunicaciones por Radio:, México: Alfaomega, 2014.
- [11] CISCO, 7 Diciembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/wireless/what-is-802-11ac.html>.
- [12] CISCO, 7 Diciembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/wireless/what-is-802-11ax.html>.
- [13] P. J. Werchau y P. Nazar, Estándar IEEE 802.11 X de las WLAN, Buenos Aires: Editorial Universitaria de la UNIVERSIDAD TECNOLOGICA NACIONAL, 2019.

- [14] G. Reggiani, O. Alimenti, G. Friedrich, S. Tonietti, F. Maidana y D. Gomez de Marco, «Adaptación de ns-2 para una Variante del Protocolo 802.11e (EDCA),» de *XVII CONGRESO ARGENTINO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN*, 2011.
- [15] O. Onur , R. Ojeda, Z. Zhao y B. Rouvio, «Efficiency optimization in WiFi Networks with Enhanced QoS: Boost the utilized network capacity,» Paris, 2014.
- [16] M. Cruz, R. Martínez Gómez y Y. Crespo García, «Análisis de la QoS en redes inalámbricas,» La Habana, 2013.
- [17] N. García Fernández, *Modelo de cobertura en redes inalámbricas basado en radiosidad por refinamiento progresivo*, 2006.
- [18] UIT-R, «Rec. UIT-R P.1238,» 2009. [En línea]. Available: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1238-0-199705-S!!PDF-S.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1238-0-199705-S!!PDF-S.pdf).
- [19] N. Ahmed, D. De y M. I. Hussain, «A QoS-aware MAC protocol for IEEE 802.11ah-based Internet of Things,» de *Fifteenth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)*, 2018.
- [20] A. Oktaviana, D. Perdana y R. M. Negara, *Performance Analysis on IEEE 802.11ah Standard with Enhanced Distributed Channel Access Mechanism*, Indonesia, 2018.
- [21] L. Tian, J. Famaey y S. Latré, «Evaluation of the IEEE 802.11ah Restricted Access Window Mechanism for dense IoT networks,» de *International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, Portugal, 2016.
- [22] O. Raeesi, J. Pirskanen, A. Hazmi y T. Levanen, «Performance evaluation of IEEE 802.11ah and its restricted access window mechanism,» de *Conference: 2014 ICC - 2014 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICC)*, 2014.
- [23] W. Sun, M. Choi y . S. Choi, «IEEE 802.11ah: A Long Range 802.11 WLAN at Sub 1 GHz,» 2013.
- [24] Instituto Federal de Telecomunicaciones, «CNAF,» 2018. [En línea]. Available: [www.ift.org.mx/espectro-radioelectrico/cuadro-nacional-de-atribucion-de-frecuencias-cnaf](http://www.ift.org.mx/espectro-radioelectrico/cuadro-nacional-de-atribucion-de-frecuencias-cnaf).
- [25] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Standards IEEE 802.11ah-2016*, 2016.

- [26] N. B y J. G. A, «Mathematical and simulation analysis of contention resolution mechanism for IEEE 802.11ah networks,» Tamil Nadu, 2018.
- [27] «ns-3,» Febreo 2021. [En línea]. Available: <https://www.nsnam.org/about/what-is-ns-3/>.
- [28] A. Šljivo, L. Tian y S. Santi, «Extension of the IEEE 802.11ah ns-3 Simulation Module,» 2018.
- [29] International Telecommunication Union, «TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS,» 27 Octubre 2017. [En línea]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.Imp729-201710-I/en>.
- [30] International Telecommunication Union, «H.264 : Advanced video coding for generic audiovisual services,» 2021.
- [31] UIT, «G.Imp729 : Implementors' Guide for G.729 (2012) "Coding of speech at 8 kbit/s using CS-ACELP",» 2017.
- [32] 21 noviembre 2019. [En línea]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11579/fichero/f.+Cap%C3%ADtulo+2+-+Familia+IEEE+802.11.pdf+>.
- [33] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «Terminología general,» de *Definiciones de términos relativos a la calidad*, 2008.