



ACTA DE APROBACIÓN DEL TEMA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Facultad: Ingeniería
Carrera: Electrónica y Telecomunicaciones

1. DATOS INFORMATIVOS DEL ESTUDIANTE

Apellidos: BONILLA TOTOY
Nombres: PATRICIA ELIZABETH
C.I / Pasaporte: 1726646654
Estudiante de la carrera de: Electrónica y Telecomunicaciones
Título del Proyecto de Investigación: SIMULACIÓN DE COEXISTENCIA E INTERFERENCIA DE 802.11AH Y BLUETOOTH LE PARA LA INTERCONEXIÓN DE DISPOSITIVOS DE IOT.
Dominio Científico: Desarrollo territorial, productivo y hábitat sustentable para mejorar la calidad de vida.
Línea de Investigación: Electrónica, telecomunicaciones y redes

2. CUMPLIMIENTO DE REQUERIMIENTOS DEL TEMA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.

Aspectos	Cumplimiento	Observaciones
Planteamiento del problema	SI	
Objetivo Generales	SI	
Título	SI	

En la Ciudad de Riobamba, a los 25 días del mes de MARZO de 2021 se reúnen los Miembros de la Comisión de Carrera, quienes luego de haber revisado y analizado la petición presentada por el estudiante y dando cumplimiento a los criterios metodológicos exigidos por la carrera, emiten el **ACTA DE APROBACIÓN** del tema de proyecto de investigación titulado "**SIMULACIÓN DE COEXISTENCIA E INTERFERENCIA DE 802.11AH Y BLUETOOTH LE PARA LA INTERCONEXIÓN DE DISPOSITIVOS DE IOT**" y asigna al **PhD. CIRO DIEGO RADICELLI GARCÍA**, como **TUTOR**, para que guíe el desarrollo del perfil, proyecto de Investigación y sustentación final.

Mgs. Luis Tello
MIEMBRO DE LA COMISIÓN DE CARRERA

Mgs. Daniel Haro
MIEMBRO DE LA COMISIÓN DE CARRERA



Mgs. Yesenia Cevallos
MIEMBRO DE LA COMISIÓN DE CARRERA

Sr. Jefferson Sanmartín
REPRESENTANTE ESTUDIANTIL



REPÚBLICA DEL ECUADOR
DIRECCIÓN GENERAL DE REGISTRO CIVIL,
IDENTIFICACIÓN Y CEDULACIÓN

CELULA DE
CIUDADANIA
APellidos y Nombres
**BONILLA TOTOY
PATRICIA ELIZABETH**
LUGAR DE NACIMIENTO
**PICHINCHA
QUITO
LA MAGDALENA**
FECHA DE NACIMIENTO **1995-08-19**
NACIONALIDAD **ECUATORIANA**
SEXO **MUJER**
ESTADO CIVIL **SOLTERO**

N. **172664665-4**



ICM 16 12 680 01

INSTRUCCIÓN **SUPERIOR** PROFESIÓN / OCUPACIÓN **ESTUDIANTE** **V3333V1222**

APELLIDOS Y NOMBRES DEL PADRE **BONILLA GULCA MANUEL**

APELLIDOS Y NOMBRES DE LA MADRE **TOTOY IZA LIZ MARIA**

LUGAR Y FECHA DE EXPEDICIÓN
**QUITO
2017-02-18**

FECHA DE EXPIRACIÓN
2027-02-18





SOLICITUD

Riobamba, 19 de enero del 2020

Mg. Alianne Araujo
Coordinadora de Gestión de Bibliotecas.
Su Despacho.-

De mi consideración:

Me dirijo a usted en la oportunidad de solicitar procesamiento en el Repositorio D-Space UNACH, del trabajo de titulación: "SIMULACIÓN DE COEXISTENCIA E INTERFERENCIA DE 802.11AH Y BLUETOOTH LE PARA LA INTERCONEXIÓN DE DISPOSITIVOS DE IOT" de la Carrera ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES; con la finalidad de que se genere el LINK correspondiente al trabajo de titulación. Asimismo, solicito se remita a la Carrera el certificado de link, para los fines subsiguientes.

Para lo cual adjunto, la siguiente documentación, digitalizada, hasta la consignación de los soportes físicos, según se establece acta compromiso de esta misma fecha.

1. Acta de aprobación del tema
2. Cédula de identidad
3. Solicitud para el procesamiento de su trabajo de Titulación
4. Acta de compromiso
5. Registro de autorización para publicación del trabajo de titulación
6. Certificación de URKUND (certificado de plagio).
7. Trabajo de Titulación

Agradeciendo la atención que se dispense a la presente.

Atentamente;

Patricia Elizabeth Bonilla Totoy:
CI: 1726646654

Número de teléfono:0987312049
Correo electrónico: pebonilla.fie@unach.edu.ec



**Coordinación de
Gestión de Bibliotecas**
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento

COMPROMISO DE CONSIGNACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN Y DOCUMENTOS FÍSICOS

Riobamba, 19 de enero del 2020

MgSc. Alianne Araujo Pirela
COORDINADORA DE GESTIÓN DE BIBLIOTECAS-UNACH
Su Despacho. -

De mi consideración:

Yo Patricia Elizabeth Bonilla Totoy, con cédula de identidad 11726646654, ex alumno de la Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Nacional de Chimborazo, por medio de la presente dejo constancia del compromiso que adquiere a fin de entregar en la Biblioteca Campus Norte "Ms. Edison Riera R." el trabajo de titulación, intitulado "SIMULACIÓN DE COEXISTENCIA E INTERFERENCIA DE 802.11AH Y BLUETOOTH LE PARA LA INTERCONEXIÓN DE DISPOSITIVOS DE IOT" y los documentos habilitantes (en físico) del registro de dicho trabajo en el Repositorio D-Space UNACH.

La consignación, del trabajo y documentos, se realizará apenas se solvente la emergencia decretada por el Gobierno Nacional relacionada al COVID-19, entendiéndose que el lapso establecido será al término de quince (15) días laborables, contados desde la fecha del restablecimiento de actividades; caso contrario me sujeto a las sanciones conforme a la reglamentación aplicable. Asimismo, la entrega de documentos falsos o información no veraz, ni legal podrá dar inicio a los procesos legales y académicos correspondientes.

Atentamente;

Patricia Elizabeth Bonilla Totoy:
CI: 1726646654

Número de teléfono:0987312049
Correo electrónico: pebonilla.fie@unach.edu.ec



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
VICERRECTORADO ACADÉMICO
COORDINACIÓN DE GESTIÓN DE BIBLIOTECAS
Registro y autorización de publicación en el Repositorio Institucional
Trabajos de Investigación para Titulación

Almacenamiento: para uso del personal de Biblioteca	Campus Edison Riera R.	X	
	Campus La Dolorosa		
	Dirección de Posgrado		
Carrera o Programa de Maestría/ Especialización: Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones			
Seleccione el tipo de trabajo de investigación para titulación o tipología documental, según aplique:			
Grado	Posgrado	Artículo científico	Otro
X			
Autor (es): Bonilla Totoy, Patricia Elizabeth			
Número de cédula de identidad: 1726646654			
Teléfono: 0987312049		Correo electrónico: pebonilla.fie@unach.edu.ec	
Tutor (a): Radicelli García, Ciro Diego; PhD.			
Título de la tesis: “Simulación de coexistencia e interferencia de 802.11ah y Bluetooth LE para la interconexión de dispositivos de IOT”			
Año: 2021	Nº páginas: 90	Nº Referencias bibliográficas: 50	Anexos:
CD: X	DVD:	Planos:	Otros adjuntos (indique): Ninguno
Colaborador (es):			
Entidad que auspicio la investigación:			
Financiamiento: Grado		Financiamiento Posgrado	
Si:	No: x	Si:	No:
Fecha de entrega del trabajo para titulación: 07/10/2021			
Grado académico a obtener: Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones			
RESUMEN:			
<p>El rápido avance del Internet de las Cosas (IoT) ha producido una proliferación de tecnologías inalámbricas de bajo consumo. Por lo que, un desafío importante, en el diseño de una red IoT, es lograr la coexistencia entre diferentes tecnologías inalámbricas que comparten el espectro ISM de 2.4 GHz sin licencia.</p> <p>Por lo anterior, este estudio presenta una simulación de coexistencia e interferencia del protocolo 802.11 ah y Bluetooth LE para la interconexión de dispositivos IoT. En este sentido, se configura una red BLE que intercambia información mediante una configuración Maestro/Esclavo, donde la comunicación de datos sucede durante eventos de conexión. Además, el canal que se usa para un evento de conexión se selecciona en función del salto de un canal adaptativo y un mapa de canales, que presenta los canales buenos y malos.</p> <p>Por otro lado, el tráfico WLAN 802.11 ah se agrega o elimina de forma dinámica del modelo, de acuerdo con el tiempo de inicio y finalización especificados. Asimismo, se configura el nivel de interferencia y probabilidad de colisión, de las ondas 802.11 que corromperán las señales BLE en los canales específicos de la red.</p> <p>Para comprobar el modelo propuesto se plantea 5 escenarios, en el primer escenario la red con tiene un maestro y un esclavo con las señales interferentes 802.11 ah, mientras que en</p>			

los escenarios posteriores el número de esclavos aumenta de forma gradual hasta llegar a un máximo de 5.

En cada escenario se cuantifica y compara el número de paquetes recibidos, número de paquetes perdidos, número de paquetes dañados, número de paquetes retransmitidos, número de canales buenos y número de canales defectuosos. Por último, la investigación demuestra que la simulación de coexistencia e interferencia de 802.11ah y Bluetooth LE facilita la interconexión de dispositivos de IoT.

Palabras claves:

Internet of Things; IEEE 802.11 ah; Bluetooth LE; Coexistence; Interference

ABSTRACT:

The rapid advance of the Internet of Things (IoT) has produced a proliferation of lowpower wireless technologies, so a major challenge in designing an IoT network is to achieve coexistence among different wireless technologies that share the spectrum 2.4 GHz ISM without license.

Therefore, this study presents a simulation of coexistence and interference of the 802.11 ah protocol and Bluetooth LE for the interconnection of IoT devices. In this sense, a BLE network is configured that exchanges information through a Master / Slave configuration, where data communication occurs during connection events. Also, the channel that is used for a connect event is selected based on the skip of an adaptive channel and a channel map showing the good and bad channels.

On the other hand, 802.11h WLAN traffic is dynamically added or removed from the model, according to the specified start and end time. Likewise, the level of interference and probability of collision of the 802.11 waves that will corrupt the BLE signals in the specific channels of the network are configured.

To verify the proposed model, 5 scenarios are proposed, in the first scenario the network has a master and a slave with interfering 802.11 ah signals, while in the subsequent scenarios the number of slaves increases gradually until reaching a maximum of 5.

In each scenario, the number of received packets, number of lost packets, number of damaged packets, number of retransmitted packets, number of good channels and number of bad channels are quantified and compared. Finally, research shows that the simulation of 802.11ah and Bluetooth LE coexistence and interference facilitates the interconnection of IoT devices.

Resolución para NO Publicar:

Si:

No:

N° Res.

Firma (s)



Patricia Elizabeth Bonilla Totoy

Yo, **Bonilla Totoy Patricia Eñizabeth**, con cédula de identidad N° **1726646654**, declaro tener conocimiento de lo establecido en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, referido a la obligación de las Instituciones de Educación Superior "a entregar los trabajos de titulación que se elaboren para la obtención de títulos académicos de grado y posgrado en formato digital para ser integrados al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor"; en tal sentido **autorizo** a la Universidad Nacional de Chimborazo a difundir a través del Repositorio Institucional UNACH el trabajo de titulación del cual soy autor. Asimismo, declaro la cesión no exclusiva de derechos de autor.

En Riobamba, a la fecha de su presentación, conforme firmo.



Patricia Elizabeth Bonilla Totoy

C.I. 1726646654

Los datos suministrados son de responsabilidad del (de los) Graduado (s), para los fines pertinentes.



CERTIFICACIÓN

Que, **BONILLA TOTOY PATRICIA ELIZABETH** con CC: **1726646654**, estudiante de la Carrera de **ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**SIMULACIÓN DE COEXISTENCIA E INTERFERENCIA DE 802.11AH Y BLUETOOTH LE PARA LA INTERCONEXIÓN DE DISPOSITIVOS DE IOT**", que corresponde al dominio científico **DESARROLLO TERRITORIAL-PRODUCTIVO Y HÁBITAT SUSTENTABLE PARA MEJORAR LA CALIDAD DE VIDA** y alineado a la línea de investigación **ELECTRÓNICA TELECOMUNICACIONES Y REDES**, cumple con el 0%, reportado en el sistema Anti plagio **nombre del sistema**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 06 de diciembre de 2021

CIRO DIEGO
RADICELLI
GARCIA

Firmado digitalmente
por CRO DIEGO
RADICELLI GARCIA
Fecha: 2021.12.06
17:25:14 -05'00'

PhD. Ciro Radicelli
TUTOR

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de:
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

TRABAJO DE TITULACIÓN

**“SIMULACIÓN DE COEXISTENCIA E INTERFERENCIA DE 802.11AH Y
BLUETOOTH LE PARA LA INTERCONEXIÓN DE DISPOSITIVOS DE IOT”**

Autor:

Patricia Elizabeth Bonilla Totoy

Tutor:

Ing. Ciro Diego Radicelli García Ph.D.

Riobamba – Ecuador

Año

2021

Los miembros del tribunal de graduación del proyecto de investigación de título: **“SIMULACIÓN DE COEXISTENCIA E INTERFERENCIA DE 802.11AH Y BLUETOOTH LE PARA LA INTERCONEXIÓN DE DISPOSITIVOS DE IOT”** presentado por: **Patricia Elizabeth Bonilla Totoy**, dirigido por: **Ciro Diego Radicelli García, PhD.**

Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en la cual se ha constatado el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la UNACH.

Para constancia de lo expuesto firman:

PhD. Leonardo Renteria
Presidente del Tribunal



Firmado electrónicamente por:
**LEONARDO FABIAN
RENERIA
BUSTAMANTE**

.....
Firma

PhD. Carlos Peñafiel
Miembro del Tribunal



Firmado electrónicamente por:
**CARLOS RAMIRO
PENAFIEL OJEDA**

.....
Firma

PhD. Daniel Santillan
Miembro del Tribunal



Firmado electrónicamente por:
**DANIEL ANTONIO
SANTILLAN HARO**

.....
Firma

DECLARACIÓN EXPRESA DE TUTORÍA

En calidad de tutor del tema de Investigación: **“SIMULACIÓN DE COEXISTENCIA E INTERFERENCIA DE 802.11AH Y BLUETOOTH LE PARA LA INTERCONEXIÓN DE DISPOSITIVOS DE IOT”**. Realizado por la Srta. **Patricia Elizabeth Bonilla Totoy**, para optar por el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, considero que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sustentada públicamente y evaluada por el jurado examinador que se designe.

Riobamba, enero 2022



Ciro Diego Radicelli García, PhD.

C.I. 1713535225

TUTOR

AUTORÍA DE INVESTIGACIÓN

La responsabilidad del contenido de este proyecto de Investigación titulado: **“SIMULACIÓN DE COEXISTENCIA E INTERFERENCIA DE 802.11AH Y BLUETOOTH LE PARA LA INTERCONEXIÓN DE DISPOSITIVOS DE IOT”**, corresponde exclusivamente a Patricia Elizabeth Bonilla Totoy, Ing. PhD. Ciro Radicelli y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional de Chimborazo.



Patricia Elizabeth Bonilla Totoy

1726646654



DICTAMEN FAVORABLE DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Facultad: Ingeniería
Carrera: Electrónica y Telecomunicaciones

1. DATOS INFORMATIVOS DOCENTE TUTOR/MIEMBRO

Apellidos: Radicelli García
Nombres: Ciro Diego
Cedula/Pasaporte: 1713535225
Tutor/Miembro: Tutor

2. DATOS INFORMATIVOS DEL ESTUDIANTE

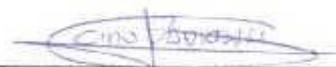
Apellidos: Bonilla Totay
Nombres: Patricia Elizabeth
C.I / Pasaporte: 1726646654
Título del Proyecto de Investigación: "Simulación de coexistencia e interferencia de 802.11AH y Bluetooth LE para la interconexión de dispositivos de IOT"
Dominio Científico: Desarrollo Territorial-Productivo y hábitat sustentable para mejorar la calidad de vida.
Línea de Investigación: Electrónica Telecomunicaciones y Redes.

3. CONFORMIDAD PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Aspectos	Conformidad Si/No	Observaciones
1. Título	SI	
2. Introducción	SI	
3. Planteamiento del problema	SI	
4. Objetivos: General y Especificos	SI	
5. Estado del arte relacionado a la temática de investigación	SI	
6. Metodología	SI	
7. Resultados y discusión	SI	
8. Cronograma del trabajo investigativo	SI	
9. Bibliografía normas APA	SI	
10. Anexos	SI	

Fundamentado en las observaciones realizadas y el contenido presentado, **SI** es favorable el dictamen Proyecto de Investigación Escrito, autorizando su empastado.

Lugar y Fecha: Riobamba, 2 de diciembre de 2021


PhD. Ciro Radicelli
DOCENTE TUTOR/MIEMBRO



DICTAMEN FAVORABLE DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Facultad: Ingeniería
Carrera: Electrónica y Telecomunicaciones

1. DATOS INFORMATIVOS DOCENTE TUTOR/MIEMBRO

Apellidos: Peñafiel Ojeda
Nombres: Carlos Ramiro
Cedula/Pasaporte: 0603888702
Tutor/Miembro: Miembro

2. DATOS INFORMATIVOS DEL ESTUDIANTE

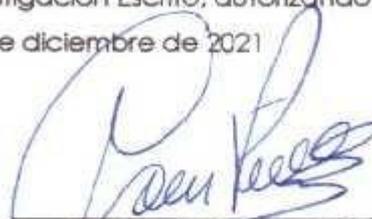
Apellidos: Bonilla Totoy
Nombres: Patricia Elizabeth
C.I / Pasaporte: 1726646654
Título del Proyecto de Investigación: "Simulación de coexistencia e interferencia de 802.11AH y Bluetooth LE para la interconexión de dispositivos de IOT"
Dominio Científico: Desarrollo Territorial-Productivo y hábitat sustentable para mejorar la calidad de vida.
Línea de Investigación: Electrónica Telecomunicaciones y Redes.

3. CONFORMIDAD PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Aspectos	Conformidad Si/No	Observaciones
1. Título	SI	
2. Introducción	SI	
3. Planteamiento del problema	SI	
4. Objetivos: General y Específicos	SI	
5. Estado del arte relacionado a la temática de Investigación	SI	
6. Metodología	SI	
7. Resultados y discusión	SI	
8. Cronograma del trabajo investigativo	SI	
9. Bibliografía normas APA	SI	
10. Anexos	SI	

Fundamentado en las observaciones realizadas y el contenido presentado, **SI** es favorable el dictamen Proyecto de Investigación Escrito, autorizando su empastado.

Lugar y Fecha: Riobamba, 6 de diciembre de 2021


PhD. Carlos Peñafiel
DOCENTE TUTOR/MIEMBRO



DICTAMEN FAVORABLE DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Facultad: Ingeniería

Carrera: Electrónica y Telecomunicaciones

1. DATOS INFORMATIVOS DOCENTE TUTOR/MIEMBRO

Apellidos: Santillán Haro

Nombres: Daniel Antonio

Cedula/Pasaporte: 0603141052

Tutor/Miembro: Miembro

2. DATOS INFORMATIVOS DEL ESTUDIANTE

Apellidos: Bonilla Totoy

Nombres: Patricia Elizabeth

C.I / Pasaporte: 1726646654

Título del Proyecto de Investigación: "Simulación de coexistencia e interferencia de 802.11AH y Bluetooth LE para la interconexión de dispositivos de IOT"

Dominio Científico: Desarrollo Territorial-Productivo y hábitat sustentable para mejorar la calidad de vida.

Línea de Investigación: Electrónica Telecomunicaciones y Redes.

3. CONFORMIDAD PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Aspectos	Conformidad Si/No	Observaciones
1. Título	SI	
2. Introducción	SI	
3. Planteamiento del problema	SI	
4. Objetivos: General y Específicos	SI	
5. Estado del arte relacionado a la temática de investigación	SI	
6. Metodología	SI	
7. Resultados y discusión	SI	
8. Cronograma del trabajo investigativo	SI	
9. Bibliografía normas APA	SI	
10. Anexos	SI	

Fundamentado en las observaciones realizadas y el contenido presentado, **SI** es favorable el dictamen Proyecto de Investigación Escrito, autorizando su empastado.

Lugar y Fecha: Riobamba, 06 de diciembre de 2021



Firmado electrónicamente por:
**DANIEL ANTONIO
SANTILLAN HARO**

PhD. Daniel Santillán
DOCENTE TUTOR/MIEMBRO



CERTIFICACIÓN

Que, **BONILLA TOTOY PATRICIA ELIZABETH** con CC: **1726646654**, estudiante de la Carrera de **ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**SIMULACIÓN DE COEXISTENCIA E INTERFERENCIA DE 802.11AH Y BLUETOOTH LE PARA LA INTERCONEXIÓN DE DISPOSITIVOS DE IOT**", que corresponde al dominio científico **DESARROLLO TERRITORIAL-PRODUCTIVO Y HÁBITAT SUSTENTABLE PARA MEJORAR LA CALIDAD DE VIDA** y alineado a la línea de investigación **ELECTRÓNICA TELECOMUNICACIONES Y REDES**, cumple con el 0%, reportado en el sistema Anti plagio **nombre del sistema**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 06 de diciembre de 2021

CIRO DIEGO
RADICELLI
GARCIA

Firmado digitalmente
por CIRO DIEGO
RADICELLI GARCIA
Fecha: 2021.12.06
17:29:14 -05'00'

PhD. Ciro Radicelli
TUTOR

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a Dios y a mis padres por su apoyo, esfuerzo y amor que me entregaron incondicionalmente en cada paso que di en esta etapa de desarrollo profesional. Por ser mi inspiración y guías en todo este tiempo de trabajo quienes confiaron sin duda en mi capacidad y juntos hemos logrado esta meta, a mis amigos con quienes compartí alegrías y tristezas quienes sin duda me brindaron su amistad, apoyo y motivación.

Patricia Elizabeth Bonilla Totoy

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por bendecirme con unos padres únicos y extraordinarios quienes me supieron guiar y brindar su apoyo a través de su trabajo, tiempo y amor en cada momento de mi vida estudiantil y personal

De la misma forma al Ing. PhD. Ciro Diego Radicelli García, por haberme guiado en este proyecto con su invaluable apoyo, orientación, en base a su experiencia y sabiduría dándome las pautas y consejos necesarios para desarrollar y concluir el proyecto de investigación.

A la Universidad Nacional de Chimborazo por ser la Institución que me abrió las puertas para mi desarrollo académico, brindándome la oportunidad para crecer como profesional con excelentes profesores que me brindaron sus conocimientos durante esta larga trayectoria.

Finalmente, a mis amigos y compañeros que tuve la oportunidad de conocer en esta etapa quienes me brindaron su confianza, apoyo y amistad

Patricia Elizabeth Bonilla Totoy

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2 JUSTIFICACIÓN	4
1.3 OBJETIVOS	6
1.3.1. General.....	6
1.3.2 Específicos.....	6
CAPITULO II	7
2. ESTADO DEL ARTE	7
2.1. MARCO TEÓRICO	8
2.1.1. IEEE 802.11 ah.....	11
2.1.2. BLE.....	12
2.1.3. COEXISTENCIA DE REDES INALÁMBRICAS DE ÁREA PERSONAL SIN LICENCIA	13
2.1.4. PROBLEMA DE INTERFERENCIA.....	13
2.1.5. MECANISMOS DE COEXISTENCIA	15
2.1.6.1 Mecanismos de coexistencia colaborativo	15
2.2.1 Mecanismos de coexistencia no colaborativo	16
CAPITULO III	18
3. METODOLOGÍA	18
CAPITULO IV	25
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
CAPITULO V	37
5. CONCLUSIONES	37

BIBLIOGRAFÍA.....	39
ANEXOS	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación entre tecnologías inalámbricas para IoT [32].....	10
Tabla 2. Descripción de velocidades de salto según su red y estándar	14
Tabla 3. Estándar IEEE 802.5.1	14
Tabla 4. Clasificación de canales	21
Tabla 5. Análisis de variables dependientes e independientes.	23
Tabla 6. Parámetros de configuración BLE.....	26
Tabla 7. Modelo de tráfico WLAN	26
Tabla 8. Ponderación cualitativa	33
Tabla 9. Modelo de tráfico WLAN	34
Tabla 10. Contingencia con las frecuencias observadas.....	35
Tabla 11. Frecuencias esperadas	35
Tabla 12. Cálculo de χ^2	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comparación de tecnología WPAN y LPWAN [33]	11
Figura 2. Modelo de coexistencia e interferencia entre BLE y WLAN.	21
Figura 3. Escenario de prueba	25
Figura 4. Escenario 1, un dispositivo con probabilidad de colisión 0.	27
Figura 5. Escenario 2, dos dispositivos con probabilidad de colisión 0.8.....	28
Figura 6. Escenario 3, tres dispositivos con probabilidad de colisión 0.8.....	29
Figura 7. Escenario 4, cuatro dispositivos con probabilidad de colisión 0.8	30
Figura 8. Escenario 5, cinco dispositivos con probabilidad de colisión 0.8.....	31
Figura 9. Resultados de simulación, escenario3, dispositivo 1.	32
Figura 10. Resultados de simulación, escenario3, dispositivo 2.	32
Figura 11. Resultados de simulación, escenario3, dispositivo 3.	33
Figura 12. Escenario 1, un dispositivo con probabilidad de colisión 0	44
Figura 13. Escenario 2, dos dispositivos con probabilidad de colisión 0.8.....	45
Figura 14. Escenario 3, tres dispositivos con probabilidad de colisión 0.8.....	46
Figura 15. Escenario 4, cuatro dispositivos con probabilidad de colisión 0.8	47
Figura 16. Escenario 5, cinco dispositivos con probabilidad de colisión 0.8.....	48
Figura 17. Resultados de simulación, escenario 1, dispositivo 1.	49
Figura 18. Resultados de simulación, escenario 2, dispositivo 1.	49
Figura 19. Resultados de simulación, escenario 2, dispositivo 2.	50
Figura 20. Resultados de simulación, escenario 3, dispositivo 1.	50
Figura 21. Resultados de simulación, escenario 3, dispositivo 2.	51
Figura 22. Resultados de simulación, escenario 3, dispositivo 3.	51
Figura 23. Resultados de simulación, escenario 4, dispositivo 1.	51
Figura 24. Resultados de simulación, escenario 4, dispositivo 2.	51

Figura 25. Resultados de simulación, escenario 4, dispositivo 3.	52
Figura 26. Resultados de simulación, escenario 4, dispositivo 4.	52
Figura 27. Resultados de simulación, escenario 5, dispositivo 1.	52
Figura 28. Resultados de simulación, escenario 5, dispositivo 2.	53
Figura 29. Resultados de simulación, escenario 5, dispositivo 3.	53
Figura 30. Resultados de simulación, escenario 5, dispositivo 4.	53
Figura 31. Resultados de simulación, escenario 5, dispositivo 5.	54

RESUMEN

El rápido avance del Internet de las Cosas (IoT) ha producido una proliferación de tecnologías inalámbricas de bajo consumo. Por lo que, un desafío importante, en el diseño de una red IoT, es lograr la coexistencia entre diferentes tecnologías inalámbricas que compartan el espectro ISM de 2.4 GHz sin licencia.

Por lo anterior, este estudio presenta una simulación de coexistencia e interferencia del protocolo 802.11 ah y Bluetooth LE para la interconexión de dispositivos IoT. En este sentido, se configura una red BLE que intercambia información mediante una configuración Maestro/Esclavo, donde la comunicación de datos sucede durante eventos de conexión. Además, el canal que se usa para un evento de conexión se selecciona en función del salto de un canal adaptativo y un mapa de canales, que presenta los canales buenos y malos.

Por otro lado, el tráfico WLAN 802.11 ah se agrega o elimina de forma dinámica del modelo, de acuerdo con el tiempo de inicio y finalización especificados. Asimismo, se configura el nivel de interferencia y probabilidad de colisión, de las ondas 802.11 que corromperán las señales BLE en los canales específicos de la red.

Para comprobar el modelo propuesto se plantea 5 escenarios, en el primer escenario la red con tiene un maestro y un esclavo con las señales interferentes 802.11 ah, mientras que en los escenarios posteriores el número de esclavos aumenta de forma gradual hasta llegar a un máximo de 5.

En cada escenario se cuantifica y compara el número de paquetes recibidos, número de paquetes perdidos, número de paquetes dañados, número de paquetes retransmitidos, número de canales buenos y número de canales defectuosos. Por último, la investigación demuestra que la simulación de coexistencia e interferencia de 802.11ah y Bluetooth LE facilita la interconexión de dispositivos de IoT.

Palabras Claves: Bluetooth LE; Coexistencia; IEEE 802.11 ah; Internet de las Cosas; Interferencia

Abstract

The rapid advance of the Internet of Things (IoT) has produced a proliferation of low-power wireless technologies, so a major challenge in designing an IoT network is to achieve coexistence among different wireless technologies that share the spectrum 2.4 GHz ISM without license. Therefore, this study presents a simulation of coexistence and interference of the 802.11 ah protocol and Bluetooth LE for the interconnection of IoT devices. In this sense, a BLE network is configured that exchanges information through a Master / Slave configuration, where data communication occurs during connection events. Also, the channel that is used for a connect event is selected based on the skip of an adaptive channel and a channel map showing the good and bad channels. On the other hand, 802.11h WLAN traffic is dynamically added or removed from the model, according to the specified start and end time. Likewise, the level of interference and probability of collision of the 802.11 waves that will corrupt the BLE signals in the specific channels of the network are configured. To verify the proposed model, 5 scenarios are proposed, in the first scenario the network has a master and a slave with interfering 802.11 ah signals, while in the subsequent scenarios the number of slaves increases gradually until reaching a maximum of 5. In each scenario, the number of received packets, number of lost packets, number of damaged packets, number of retransmitted packets, number of good channels and number of bad channels are quantified and compared. Finally, research shows that the simulation of 802.11ah and Bluetooth LE coexistence and interference facilitates the interconnection of IoT devices.

Keywords: Internet of Things; IEEE 802.11 ah; Bluetooth LE; Coexistence; Interference



Filmado electrónicamente por:
HUGO ALONSO
SOLIS

Reviewed by:
Mgs. Hugo Solis Viteri
ENGLISH PROFESSOR
C.C. 0603450438

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el surgimiento del denominado Internet de las Cosas (IoT) por sus siglas en inglés, ha producido un incremento explosivo en la cantidad de dispositivos inalámbricos inteligentes, además varios estándares de comunicación se han enfocado en brindar conectividad a los dispositivos de IoT. Especificaciones como ZigBee / IEEE 802.15.4e se ha utilizado en la mayoría de las redes de sensores inalámbricos, debido a su bajo costo de implementación, la gran cantidad de dispositivos compatibles, las velocidades de datos ofrecidas (20 a 250 kbps) y el bajo consumo de energía, lo que las hace atractivas para algunas aplicaciones en IoT de baja velocidad y corto alcance [1].

El Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3GPP), a través de la Comunicación Tipo Máquina (MTC), también está haciendo un esfuerzo para estandarizar las comunicaciones Máquina a Máquina (M2M), ofreciendo características como calidad de servicio, movilidad y soporte de roaming basado en tecnologías celulares, además, de las bandas de frecuencia más altas utilizadas en 3GPP MTC. La reconfiguración del espectro del Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM), con licencia brinda la posibilidad de usar frecuencias por debajo de 1 GHz [2].

El 3GPP también se ha introducido al Internet de las cosas de banda estrecha (NB-IoT) que permite a los operadores utilizar una porción mínima del espectro disponible (redes de evolución a largo plazo, LTE o GSM) para apuntar a aplicaciones de IoT de gama ultra baja. Sin embargo, NB-IoT no es totalmente compatible con los dispositivos 3GPP existentes. Por otro lado, las soluciones LPWAN han aparecido en competencia para conquistar el mercado de IoT. Probablemente, las soluciones más destacadas en la actualidad son LoRa (Long Range) y SigFox (ultra-narrowband) que presentan grandes rangos de cobertura y mayor número de dispositivos compatibles [3].

En respuesta algunas tecnologías inalámbricas de baja potencia como IEEE 802.11ah y Bluetooth de baja energía (BLE), han sido desarrolladas y adoptadas de manera amplia. BLE es una enmienda de Bluetooth 4.0 que se centra en el bajo consumo de energía y la comunicación de baja velocidad de corto alcance. En la actualidad, el Grupo de Interés Especial (SIG), está desarrollando Bluetooth 5.0 que promete mejoras en las velocidades de datos y los rangos de cobertura [4]. La banda operativa permitida a escala global para estos estándares es 900 MHz y 2.4 GHz respectivamente. Sin embargo, dichas frecuencias son usadas por varios estándares, por ejemplo, IEEE 802.11 [5]. El resultado es la interferencia

entre técnicas que afectan a la Calidad del Servicio (QoS) de la red, en especial en la confiabilidad y la latencia. Por lo tanto, lograr la coexistencia de las diferentes tecnologías inalámbricas es un gran desafío en el diseño de una red de IoT [6].

La coexistencia entre diversas tecnologías inalámbricas se clasifica en tres dominios: espacio, tiempo y frecuencia. Los problemas asociados a la coexistencia se pueden evitar con el cumplimiento de las siguientes condiciones:

- Espaciado adecuado entre redes.
- Tiempo compartido controlado por canal.
- Separación de frecuencia adecuada entre las redes.

Los mecanismos de coexistencia se pueden clasificar en dos categorías: no cooperativo y cooperativo, dependiendo si las redes de las que se compone el sistema operan independientemente unas de otras o coordinan su uso del espectro. En la coexistencia no cooperativa cada red trata a las demás redes presentes como interferencia y realiza la mitigación de interferencias. En la coexistencia cooperativa todas las redes colaboran y coordinan el uso del espectro de una manera justa. Por ejemplo, el uso de coexistencia cooperativa en una puerta de enlace inteligente que coordina el uso del espectro entre varias redes que emplean diferentes tecnologías inalámbricas.

CAPÍTULO I

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La tecnología Wi-Fi HaLow, 802.11ah define el funcionamiento de redes exentas de licencia en bandas de frecuencia por debajo de 1 GHz (típicamente la banda de 900 MHz), excluyendo el espectro usado por TV White Space. El propósito de 802.11ah es crear redes Wi-Fi de rango extendido que sean más remotas en el espacio de 2.4 GHz y 5 GHz, con velocidades de datos de hasta 347 Mbps. Además, la norma tiene como objetivo que los dispositivos destinados a IoT se comuniquen con un consumo de energía mínimo. Wi-Fi HaLow puede competir con las tecnologías Bluetooth en el hogar debido a sus necesidades de energía inferiores (5-10 mW). El protocolo fue aprobado en septiembre de 2016 y publicado en mayo de 2017 [7].

Por otro lado, Bluetooth Low Energy (BLE) es un nuevo sistema bluetooth 4.0 que viene incorporado en los smartphones a partir del 2013. Emite una señal de 2.4GHz con un alcance de hasta 100 metros, posee la gran ventaja de que consume muy poca energía y permite emitir señales durante meses e incluso años sin tener que recargar la batería. BLE permite una transferencia de datos bidireccional utilizando ondas de radio UHF que operan en la banda de 2,4 GHz, pudiendo utilizar 40 canales físicos para la multiplexación de tiempo y frecuencia, con una separación de 2 MHz del siguiente (es decir, de 2,4 GHz a 2,8 GHz). Algunos canales se utilizan para la publicidad Bluetooth, mientras que otros han sido diseñados para fines de conexión. Los dispositivos Bluetooth transmiten bloques para permitir la difusión de datos: esto se llama Publicidad. Se trata de bloques de 31 bytes que pueden contener información específica del remitente [3]. También se utilizan para conectar otros dispositivos (normalmente escáneres). Existen varios tipos de paquetes de publicidad, con el fin de ofrecer una amplia gama de diferentes funcionalidades (utilizados para la publicidad directa o indirecta con o sin conexión disponible).

Cuando existen diferentes tipos de redes inalámbricas que operan en la misma banda de frecuencia sin licencia, es posible que las redes interfieran entre sí. Esta interferencia puede causar fallas de transmisión en ambas redes. No existe un algoritmo estandarizado para conseguir la coexistencia de dos redes inalámbricas diferentes. Sin embargo, el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos IEEE por sus siglas en inglés, especifica algunas prácticas recomendadas para establecer la coexistencia de redes de área personal inalámbrica (WPAN) con otros dispositivos inalámbricos que operan en bandas de frecuencia sin licencia [8] [9].

Cuando se habla de IoT es necesario garantizar que este tipo de dispositivos funcionen todo el tiempo, por lo tanto, la coexistencia es esencial para obtener una comunicación estable y confiable. Sin coexistencia, no se puede contar con que los dispositivos de IoT funcionen como se esperaría en entornos inalámbricos abarrotados. Las consecuencias de una falta de coexistencia en este tipo de escenarios es que los dispositivos no se puedan identificar entre sí para compartir de manera colaborativa las ondas de radio, produciendo comportamientos inesperados e incluso peligrosos [1].

Por otro lado, no es posible obtener un alto grado de confianza con la coexistencia de redes sin considerar algunas medidas durante el proceso de diseño. La acción principal consiste en realizar pruebas de coexistencia, estas permiten determinar la tolerancia de los dispositivos a otras señales de radio y caracterizar los comportamientos en presencia de protocolos de radio alternativos. Además, las pruebas de coexistencia son la única forma de evaluar con precisión la capacidad de los dispositivos para mantener el rendimiento inalámbrico funcional (FWP) en presencia de señales intencionales y no intencionales (interferentes). Por lo tanto, es necesario realizar un modelado de la interferencia WLAN en coexistencia con una red BLE [10].

Para proporcionar una solución de coexistencia en una aplicación determinada es necesario estudiar la repercusión de la interferencia entre las tecnologías involucradas, así como su rendimiento. Existen varios estudios sobre la coexistencia de tecnologías inalámbricas, sin embargo, no analizan sistemáticamente el efecto de la interferencia entre redes. Por lo que, los resultados son bastantes inconclusos e incluso contradictorios. Además, aún no se ha llevado a cabo ninguna investigación sobre la coexistencia entre IEEE 802.11ah y Bluetooth LE. La elección de IEEE 802.11ah y Bluetooth LE se debe a que son estándares dedicados a IoT [2].

1.2 JUSTIFICACIÓN

Los dispositivos de IoT deben funcionar sin problemas, independientemente del estándar en el que se construyan y sin importar cuan denso sea el entorno inalámbrico. Para lo cual, es necesario comprender la coexistencia [4].

La coexistencia es la capacidad de los equipos inalámbricos para funcionar en presencia de otros equipos que utilizan protocolos o estándares operativos diferentes. Cuando dos equipos inalámbricos están cerca uno del otro y funcionan en la misma

frecuencia o en una frecuencia cercana, ambos se verán afectados. La utilización de espectro más densa se encuentra en las bandas "ISM" sin licencia de 2,4 y 5 GHz. Los dispositivos Bluetooth, los hornos microondas, los teléfonos inalámbricos y las cámaras de vigilancia inalámbricas son ejemplos de equipos inalámbricos que pueden causar interferencias. El espectro autorizado, como las bandas de teléfonos móviles, está más controlado, pero sus transmisiones pueden afectar a los usuarios de bandas de frecuencia cercanas [11].

En general existen cuatro factores clave que impulsan la atención sobre la coexistencia:

- La coexistencia permite un mayor uso de tecnología inalámbrica para la conectividad de equipos críticos
 - Permite el uso intensivo de espectro compartido o sin licencia
 - Tasas de implementación más altas de equipos sensibles, incluidos dispositivos médicos (bombas de infusión intravenosa, marcapasos) y dispositivos de detección de emergencia.
 - Implementaciones masivas de sensores para ciudades inteligentes, aplicaciones industriales entre otras.

Estos factores impactan directamente en la confiabilidad de las comunicaciones para los dispositivos de IoT. Por lo tanto, un modelado estadístico de la interferencia WLAN en una red BLE es necesario. La comunicación WLAN dedicado a IoT requiere un ancho de banda mínimo de 1 MHz, mientras que los dispositivos BLE requieren un ancho de banda de 2 MHz. La red inalámbrica (WLAN) utiliza un mecanismo de acceso de canal llamado acceso múltiple de sentido portador con la evitación de colisiones (CSMA/CA), mientras que los dispositivos BLE utilizan el salto de frecuencia. La interferencia ocurre cuando la frecuencia de funcionamiento de los dispositivos BLE y WLAN se superpone. Para minimizar la interferencia, se utilizan mecanismos de coexistencia [12].

Los mecanismos de coexistencia se clasifican ampliamente en estas dos categorías, colaborativo y no colaborativo. Considerando que la mayor parte de redes destinadas a IoT son redes ya desplegadas que usan estándares derivados del estándar IEEE 802.11 se eligió un estudio de coexistencia que se basa en un mecanismo de coexistencia no colaborativo para los dispositivos BLE con la red inalámbrica (WLAN).

Al llevar a cabo el estudio de coexistencia se espera obtener resultados sobre la coexistencia BLE con interferencia estadística WLAN, considerando varios aspectos. La probabilidad de colisión de cada red WLAN que se utilizara para corromper los paquetes

BLE. Los dispositivos BLE maestro-esclavo que emplean canales sin problema para comunicarse entre sí y la tasa de éxito de cada canal BLE [10].

1.3 OBJETIVOS

1.3.1. General

Simular la coexistencia e interferencia de 802.11ah y Bluetooth LE, mediante el uso de la herramienta MATLAB, para la interconexión de dispositivos de IoT.

1.3.2 Específicos

- Analizar los protocolos 802.11 ah y Bluetooth LE.
- Analizar el modelo de coexistencia entre redes de área local y personal
- Analizar el modelo de interferencia de redes de área local sobre redes de área personal.
- Simular tanto la coexistencia como la interferencia entre 802.11 ah y Bluetooth LE.

CAPITULO II

2. ESTADO DEL ARTE

En estudio descrito en [13] presenta algunas técnicas de coexistencia que pueden lograr una distribución equitativa del espectro entre las redes IEEE 802.11ah e IEEE 802.15.4g. En este se describe un método de evaluación de canal claro de detección de energía, para permitir que, los dispositivos IEEE 802.11ah detecten las transmisiones de paquetes IEEE 802.15.4g en curso. Además, se considera un mecanismo de retroceso para los dispositivos IEEE 802.11ah para evitar interferir con el proceso de transmisión de paquetes IEEE 802.15.4g.

La tecnología IEEE 802.11ah opera en las bandas por debajo de 1GHz que están sujetas a varias regulaciones de coexistencia establecidas por las autoridades. En Europa, los dispositivos en las bandas inferiores a 1 GHz deben cumplir con el límite máximo del ciclo de trabajo del 2,8%, siempre que sean compatibles con la configuración, Escuchar antes de hablar (LBT) [14]. En este contexto, el ciclo de trabajo se define como el porcentaje del tiempo máximo de “encendido” del transmisor en una frecuencia portadora, medido durante un período de 1 h. Asimismo, se presenta en [15] los desafíos de las limitaciones del ciclo de trabajo y su efecto en el rendimiento de la red IEEE 802.11ah desde la perspectiva de la transmisión de enlace ascendente. Los resultados obtenidos muestran que, en presencia de los estrictos requisitos de coexistencia en las bandas por debajo de 1GHz, IEEE 802.11ah puede proporcionar un soporte eficiente para los casos de uso más importantes, como la automatización de viviendas / edificios y la atención médica, donde el tráfico de una estación o nodo individual está fuertemente insaturado.

Por otro lado, la investigación descrita en [16] considera un escenario de radio cognitiva (CR), donde una red secundaria se ubicaba juntamente con una red primaria, utilizando el protocolo IEEE 802.11ah e IEEE 802.11af respectivamente. Los usuarios secundarios (SU) explotan los canales con licencia siempre que los usuarios primarios (PU) legítimos están inactivos, mientras tanto, los usuarios secundarios están obligados a desocupar inmediatamente el canal una vez que las PU se activan. Para evitar colisiones entre SU y PU, especialmente PU ocultas, se emplea un protocolo RACIR (Restricted Access Collision and Interference Resolutions) de detección de portadora para redes IEEE 802.11ah basadas en CR. El RACIR considera, en primera instancia, un algoritmo de división de grupo descentralizado para distribuir las estaciones participantes en múltiples grupos basado en un método de estimación probabilística para resolver colisiones. En segundo lugar, para evitar

PU ocultas, tanto el transmisor como el receptor realizan la detección de portadora. Una vez que se detectan las PU activas, un transmisor o receptor emite una señal de interferencia para detener la transmisión e invocar un estado de bloqueo durante un tiempo predefinido, con el fin de dejar libre el canal para las PU [17].

Se presenta en [18] un análisis de la coexistencia de los modos mono canal del estándar IEEE 802.15.4 con otros protocolos que operan en la banda de 2,4 GHz. Los autores examinan datos empíricos y estudios analíticos para la coexistencia del IEEE 802.15.4 en 2.4 GHz con Wi-Fi, Bluetooth clásico y hornos microondas. El autor concluye que, la coexistencia de los modos de canal único de IEEE 802.15.4 con redes Wi-Fi y Bluetooth clásicas conduce a un rendimiento aceptable, siempre y cuando exista una adecuada separación de frecuencias. En consecuencia, el estudio propone varios métodos para mejorar la coexistencia de estándares, así como, la selección de canales y la separación física. Estos hallazgos se respaldan aún más en [19], donde se investiga la coexistencia de los modos de canal único de IEEE 802.15.4 y BLE a través de pruebas de tasa de error de paquetes. Las pruebas se realizan en presencia de interferencias externas en los 2.4 GHz, es decir, enrutadores Wi-Fi, redes IEEE 802.15.4 y dispositivos Bluetooth. El estudio muestra que el intervalo de conexión de BLE debe establecerse cuidadosamente para lograr un mejor rendimiento de ambas redes interferentes.

El estudio propuesto en [20] analiza la coexistencia entre BLE, modos mono canal de IEEE 802.15.4 y WiFi en la capa PHY. Para lo cual, se presentan un análisis matemático de los parámetros espaciales, temporales y de frecuencia del impacto de la interferencia en la tasa de errores de paquetes de cualquiera de las redes. Asimismo, se analiza la coexistencia de la capa MAC a través de configuraciones experimentales. El autor concluye que BLE se ve más afectado por IEEE 802.15.4, debido a que, este último emplea modulación DSSS, lo que da como resultado una mayor ganancia de proceso, pero una mayor ocupación del canal. Esto afecta directamente a BLE debido a su menor velocidad de datos [21].

2.1. MARCO TEÓRICO

El IoT es un concepto novedoso en el campo de la tecnología de la información y comunicación, donde la conectividad debe estar siempre disponible, para cualquier dispositivo, en cualquier momento y lugar, esto implica algunos cambios significativos que afectan a la vida de las personas [22]. Por lo que, es esencial el desarrollo de tecnologías de comunicación que cumplan con los criterios de rendimiento de las aplicaciones de IoT, estos

incluyen: consumo de energía, conectividad a gran escala, rango de transmisión, retardo limitado y rendimiento estable [23-24].

Las tecnologías actuales, que se emplean para la comunicación, de IoT de bajo consumo se clasifican en dos tipos: tecnologías de red de área personal inalámbrica (WPAN) [25], y redes de área amplia de bajo consumo (LPWAN) [26], cada una de estas describen varios estándares que poseen características como: frecuencia, topología, rango de cobertura y velocidad de datos (ver Tabla 1). Las tecnologías WPAN proporcionan una velocidad de datos media, es decir, hasta algunos kilobits por segundo, a corto alcance, por el contrario, las tecnologías LPWAN se centran en comunicaciones de largo alcance, es decir, hasta varias decenas de kilómetros, y admiten una velocidad de datos baja o media [27-28]. En este contexto, Zig-Bee está desarrollado en base al estándar IEEE 802.15.4, además, admite una gran cantidad de dispositivos y una gran cobertura, debido a que emplea una topología de malla. En contraste, BLE emplea una topología en estrella y consume menor energía [29].

Por otro lado, eMTC y NB-IoT son tecnologías 5G destinadas para aplicaciones de IoT, además, estas operan en bandas de frecuencia con licencia. Así mismo, la tecnología LoRa admite alta movilidad, mientras que, SigFox posee un gran rango de cobertura. Sin embargo, estas tecnologías son aplicables a un conjunto limitado de escenarios de IoT, por lo que, existe una brecha importante en cuanto a una tecnología de comunicación de baja potencia, que ofrezca un rendimiento suficiente con rangos de transmisión medios [30].

Por lo anterior, el estándar IEEE 802.11 surge como una tecnología LPWAN, que permite llenar las limitantes de tecnologías similares, pues este posee una velocidad de datos alta y el rango de transmisión medio a comparación de la mayoría de las tecnologías LPWAN (Figura 1) [31].

Tabla 1. Comparación entre tecnologías inalámbricas para IoT [32]

Tipo	Tecnología	Frecuencia	Ancho de banda	Topología	Rango	Velocidad de datos	Ventajas	Desventajas
WPAN	<i>BLE</i>	<i>2.4 GHz</i> <i>(ISM)</i>	<i>2 MHz</i>	<i>Estrella</i>	<i>30 m</i>	<i>1 - 2 Mbps</i>	<i>Velocidad de datos media</i>	<i>corta distancia</i>
	Zig-Bee (IEEE 802.15.4)	2.4/Sub GHz (ISM)	5 MHz	Malla	100 m	10 - 250 Kbps	gran cobertura	baja velocidad de datos
LPWAN	LoRa	Sub GHz (ISM)	125/500 KHz	Estrella	20 km	300 - 500 Kbps	gran cobertura alta movilidad	baja velocidad de datos
	SigFox	Sub GHz (ISM)	100 KHz	Estrella	50 km	100 bps	larga distancia	baja velocidad de datos
	NB - IoT (5G)	Sub GHz (con licencia)	180 KHz	Celular	15 km	250 bps	larga distancia	baja velocidad de datos
	eMTC (5G)	Sub GHz (con licencia)	1.4 MHz	Celular	N. A	1 Mbps	larga distancia alta movilidad baja latencia alta fiabilidad	baja velocidad de datos
	Wi - SUN (IEEE 802.15.4)	Sub GHz (ISM)	200 KHz - 1.2 MHz	Malla	1000 m	50 kbps - 2.4 -Mbps	velocidad de datos media	media distancia
	<i>IEEE 802.11 ah</i>	<i>Sub-GHz</i> <i>(ISM)</i>	<i>1 - 16 MHz</i>	<i>Estrella</i>	<i>1000 m</i>	<i>150 kbps - 78 Mbps</i>	<i>velocidad de datos alta</i>	<i>media distancia</i>

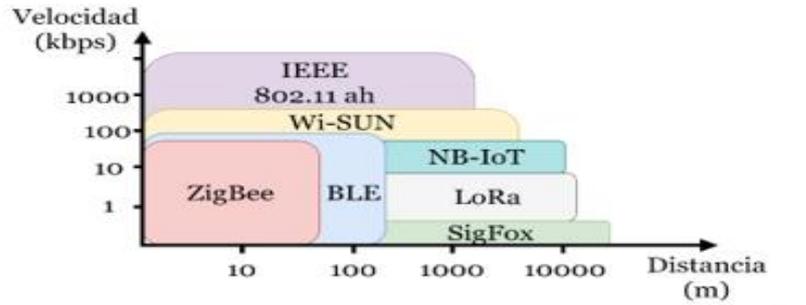


Figura 1. Comparación de tecnología WPAN y LPWAN [33]

2.1.1. IEEE 802.11 ah

La tecnología inalámbrica IEEE 802.11 se emplea para proporcionar conectividad de banda ancha de último salto. De tal manera que, para abordar de forma eficaz los casos de uso de IoT, se ha desarrollado la enmienda IEEE 802.11 [34]. Esta resuelve nuevos desafíos tecnológicos pues proporciona algunas mejoras, incluyendo: mejoras de ahorro de energía, mayor rango de transmisión y permite la conexión de un mayor número de estaciones (STA) [35].

La única enmienda de IEEE 802.11 que puede operar en bandas ISM, por debajo de 1 GHz, es IEEE 802.11ah, por lo tanto, esta no requiere soporte heredado. En este contexto, los canales operativos disponen de algunos anchos de banda, incluyendo: 1, 2, 4 y 8 MHz, donde 1 y 2 MHz se destinan de forma prioritaria para su uso en aplicaciones de IoT. Por otro lado, un parámetro importante, que afecta al funcionamiento exacto de IEEE 802.11 ah, es el régimen reglamentario de diferentes zonas, así como el ancho de banda del canal disponible, este último puede variar entre 5 y 26 MHz. Además, las velocidades típicas para un canal, cuando se usa la transmisión de antena única, de 2 MHz varía entre 650 y 7.8 Mb/s, así mismo, depende del algoritmo de adaptación de enlace [36].

Por otro lado, IEEE 802.11 ah emplea mecanismos mejorados de ahorro de energía y el control de acceso medio (MAC), que utiliza el acceso múltiple con detección de portadora y prevención de colisiones (CSMA / CA), como en la familia IEEE 802.11. Así mismo, esta enmienda incluye características como: tramas de baliza cortas, segmentación del mapa de indicación de tráfico (TIM), una categoría de STA de tipo de sensor, respuestas de control de paquetes de datos nulos y extensión del ciclo de sueño hasta 5 años. Además, las funciones más avanzadas, como la ventana de acceso restringido y el tiempo de activación objetivo, son opcionales y se pueden usar para mejorar el rendimiento del sistema.

También, IEEE 802.11ah especifica el uso de relés que extienden su rango de operación [37].

2.1.2. BLE

La tecnología BLE describe un estándar inalámbrico abierto para comunicaciones de corto alcance, este se originó en el año 2010 y fue parte de las especificaciones de Bluetooth 4.0. BLE opera en la banda ISM de 2,4 GHz y el espectro disponible se divide en 40 canales de 1 MHz de ancho de banda, estos incluyen tres canales publicitarios y 37 de datos. Por otro lado, la tasa de transmisión por aire alcanza el 1 Mb/s, para lo cual, se emplea la codificación por desplazamiento de frecuencia gaussiana (GFSK) [38].

En la versión de Bluetooth 5.0 se admiten velocidades adicionales para comunicaciones de mayor rendimiento (2 Mb/s) y transmisiones de largo alcance (500 y 125 kb/s). En este contexto, los tiempos de transferencia de datos y la configuración de la conexión son cortos, esto permite que la aplicación establezca una conexión y transfiera los datos autenticados en pocos milisegundos [39].

En cuanto el acceso al medio, BLE posee dos modos de transferencia de datos, estos incluyen: datos sin conexión y orientados a la conexión. En el primer modo, BLE emplea un ALOHA básico para sus tres canales de publicidad, mientras que, en el segundo modo, este utiliza el acceso al canal de tipo ALOHA y el salto de frecuencia para la transmisión de datos. Además, para la segmentación y reensamblaje de paquetes de gran tamaño se usa el Protocolo de Adaptación y Control de Enlace Lógico (L2CAP) [40].

Por otro lado, BLE está diseñado para un consumo de energía ultra bajo, esto se logra mediante una arquitectura servidor-cliente y roles asimétricos, donde los dispositivos "periféricos" simples tienen un conjunto mínimo de responsabilidades y no realizan cálculos complejos, debido a que, estos cálculos los realizan dispositivos robustos denominados "centrales". En este contexto, la topología de la red BLE se limita a las redes en estrella de un solo salto y red de pares, sin embargo, se espera que en futuras especificaciones para BLE, la red en malla se estandarice [41].

En contraste, para llevar a cabo una conexión, BLE emplea un intervalo de publicidad de 20 ms. Así mismo, la transferencia se lleva a cabo sobre una conexión BLE, esta se configura con un intervalo de conexión de 7,5 ms y utiliza saltos de frecuencia en los 37 canales de datos. No obstante, en la mayoría de los casos, los datos se suelen entregar correctamente en el primer evento de conexión. Una vez que el mensaje se ha entregado con éxito, la conexión BLE finaliza.

2.1.3. COEXISTENCIA DE REDES INALÁMBRICAS DE ÁREA PERSONAL SIN LICENCIA

En la actualidad, es muy común implementar de forma simultánea dispositivos IEEE 802.15 y otros que operan en las mismas bandas de frecuencia, por ejemplo, BLE y 802.11. Por esta razón, el estándar 802.15.2 se desarrolló con el objetivo de facilitar la coexistencia de dispositivos WPAN con dispositivos inalámbricos similares que operen en una misma banda de frecuencia sin licencia [24] [42].

El estándar IEEE 802.15.2 describe algunos mecanismos de coexistencia, los cuales se pueden aplicar para las redes WLAN y WPAN. Estos mecanismos se dividen en dos clases: colaborativas y no colaborativas [30]. El mecanismo de coexistencia colaborativa se aplica cuando existe un enlace de comunicación entre las redes WLAN y WPAN, es decir que, este es posible implementarlos cuando los dispositivos integrados en el mismo equipo, por ejemplo, una tarjeta IEEE 802.11b y un módulo IEEE 802.15.1 integrados en el mismo computador. Por otro lado, el mecanismo de coexistencia no colaborativa no requiere ningún enlace de comunicación [43].

2.1.4. PROBLEMA DE INTERFERENCIA

Los estándares IEEE 802.11b y IEEE 802.15.1 funcionan en la misma banda de frecuencia de 2.4 GHz sin licencia, esto implica que podría existir una interferencia mutua entre los dos sistemas inalámbricos y por consecuencia se produce una degradación grave del rendimiento [44]. En este sentido, existen algunos factores que afectan el nivel de interferencia, estos incluyen: separación entre los equipos WLAN y WPAN, cantidad de tráfico de datos generado por cada red inalámbrica, los niveles de potencia de los dispositivos y la velocidad de datos. Así mismo, los diferentes tipos de información que se envían mediante las redes inalámbricas poseen diferentes niveles de sensibilidad a la interferencia, por ejemplo, un enlace de voz es más sensible a las interferencias de radio a comparación de un enlace de datos que se utiliza transferir un archivo de datos.

Por otro lado, existen varias versiones de la capa física (PHY) 802.11, no obstante, estas emplean una subcapa MAC común. Así mismo, al implementar la función de coordinación distribuida (DCF), 802.11 emplea el CSMA/CA para MAC. Además, el alcance de 802.15.2 se limita a las implementaciones DCF de IEEE 802.11, esto no incluye el esquema de acceso a la función de coordinación de puntos (PCF).

Es los inicios, 802.11 incluía una capa PHY de espectro ensanchado con salto de frecuencia (FHSS) de 1 y 2 Mbps, así como una capa de espectro ensanchado de secuencia

directa (DSSS) con la misma velocidad. En este contexto, la capa DSSS emplea un canal de 22 MHz, donde puede admitir un máximo de tres canales que no se superponen en l banda sin licencia. Así mismo, la capa FHSS emplea una separación de 1 MHz entre canales y salta de manera aleatorio sobre 79 canales [45].

La capa DSSS de IEEE 802.11 se modificó para utilizar la codificación de código complementario (CCK), esto permite administrar velocidades de datos de 5.5 y 11 Mbps. Esta capa de alta velocidad se estandariza y adopta el nombre de IEEE 802.11b, las velocidades que maneja son: 1, 2, 5.5 y 11 Mbps, mientras que, la capa física posee un ancho de banda de 22 MHz [46].

Por otro lado, la WPAN emplea una cubierta de IEEE 802.15.1, el cual es un sistema FHSS de 1 Mbps. Así mismo, la capa física de esta emplea 79 canales de 1 MHz de ancho de banda y realiza saltos aleatorios con una velocidad de 1600 saltos por segundo. Además, la subcapa MAC permite el uso de una topología maestro-esclavo denominada piconet, donde, el dispositivo maestro controla el acceso al medio de los esclavos mediante un sondeo y la transmisión periódica programada de paquetes de datos [47].

Para las redes WLAN y WPAN los canales de salto son los mismos, no obstante, los sistemas se ejecutan en distintas velocidades de salto como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Descripción de velocidades de salto según su red y estándar

Redes	Estándar	Velocidades de Saltos	Frecuencia
WLAN	IEEE 802.11	2.5 saltos / S	100 ms
WPAN	IEEE 802.15.1	1600 saltos / S	160 veces en el mismo lapso

Desde otro punto de vista, la redes WPAN ingresa en la banda de paso de la WLAN existe una colisión entre las tramas IEEE (802.11b y 802.15.1). Esto sucede ya que el ancho de banda del estándar IEEE 802.11b trabaja en una frecuencia de 22 MHz. Para la IEEE 802.15.1, coinciden el total de los 79 canales, 22 están en la banda de paso de WLAN esto conlleva a un inconveniente ya que afecta el nivel de la interferencia estudiada con la velocidad de datos de la WLAN. En el caso si está habilitado, es probable que la interferencia de WPAN haga que la WLAN tenga una velocidad más baja en sus datos. Si la velocidad de transmisión de datos es menor, la duración de las tramas de WLAN aumenta, esto puede ser a las colisiones de las tramas WPAN [48].

El estándar IEEE 802.15.1 utiliza dos tipos de enlaces como se presenta en la Tabla 3 entre el maestro y el esclavo piconet, para la transferencia de datos.

Tabla 3. Estándar IEEE 802.5.1

Estándar	Enlace asíncrono sin conexión (ACL)	Incorpora una solicitud de repetición automática (ARQ) para garantizar una transmisión confiable de información
IEEE 802.15.1	Enlace orientado a conexión síncrona (SCO)	Los enlaces SCO no admiten ARQ Una degradación perceptible en la calidad de voz durante la duración de la IEEE

En el caso que se presente una interferencia el estándar IEEE 802.15.1 usa FHSS y el IEEE 802.11b utiliza el DSSS y CCK. En el ancho de banda de IEEE 802.11b su frecuencia es de 22 MHz. Por consiguiente de los 79 canales de salto 22 están disponibles para los saltos, IEEE 802.15.1 están sujetos a interferencias. El sistema FH es susceptible a la interferencia de los canales adyacentes aumentando el número total de canales de interferencia de 22 a 24 [48].

2.1.5. MECANISMOS DE COEXISTENCIA

Se dividen en dos categorías, colaborativos y no colaborativos. El primero intercambia información y requiere comunicación entre WLAN IEEE 802.11 y la WPAN IEEE 802.15, mientras que, el segundo no intercambia información y es aplicable después de que se establezca una WLAN o WPAN, para proceder a enviar los datos del usuario [48].

Los dos mecanismos de coexistencia consisten en atenuar la interferencia resultante de la operación de dispositivos IEEE 802.15.1 en presencia de dispositivos WLAN de frecuencia estática o de salto lento. Tomando en cuenta que FH mitiga la interferencia debida a varios dispositivos IEEE 802.15.1. Para trabajos futuros se implementará al menos una estación WLAN y un dispositivo WPAN estarán situadas en una misma unidad física, sobre la cual debe haber un enlace de comunicación entre ellos para obtener una conexión por cable o una solución integrada.

2.1.6.1 Mecanismos de coexistencia colaborativo

Se definen tres mecanismos de coexistencia colaborativa

- Dos técnicas basadas en la subcapa MAC: Coordina la programación de la transmisión de tramas entre WLAN (IEEE 802.11b) y WPAN (IEEE 802.15.1).
- Una técnica basada en el método de capa PHY: Es un filtro programable en el receptor de IEEE 802.11b que elimina la interferencia del IEEE 802.15.1.

Las dos técnicas se podrían utilizarse por separado o combinarse con otros para proporcionar un mejor mecanismo de coexistencia. Por otro lado, los dispositivos heredados

de los mecanismos se eligen entre dos modos de funcionamiento según la topología de la red y el tráfico aceptado.

- El tráfico IEEE 802.15.1 SCO como el tráfico ACL son compatibles donde el tráfico SCO tiene mayor prioridad que el tráfico ACL en la programación.

- Consiste en el modo TDMA (acceso múltiple por división de tiempo) y se utiliza cuando existe tráfico ACL en áreas de alta densidad de piconet, el intervalo del tiempo de transmisión de baliza objetivo (TBTT), se subdivide en dos subintervalos: un subintervalo dedicado a IEEE 802.11b y otro para IEEE 802.15.1.

Cada radio tiene su propio subintervalo, dicha técnica necesita una propiedad adicional para limitar la transmisión del maestro IEEE 802.15.1. Se utiliza un software de administración de un AP (punto de acceso).

El AWMA como PTA se puede combinar para obtener un mecanismo de coexistencia más inteligente. El estándar recomienda el despliegue de mecanismos de coexistencia colaborativa AWMA o PTA [48]. El mecanismo PTA se puede emplear sin supresión de interferencia, la unión de los dos mecanismos produce una mayor coexistencia de WLAN-WPAN y un óptimo rendimiento del sistema. Cuando exista una alta densidad de unidades físicas que integran dispositivos WLAN-WPAN en un área común, es decir, igual o mayor que a tres unidades en un círculo de radio de 10m como define el estándar [48]. El enlace de voz (WPAN SCO) no se está utilizando, motivo que se recomienda que se utilice el mecanismo AWMA, si la densidad de unidades que incorporan los dispositivos WLAN-WPAN es baja, es decir, menos de tres unidades en un círculo con un radio de 10m, en consecuencia se sugiere que el mecanismo PTA sea ejecutado [48].

2.2.1 Mecanismos de coexistencia no colaborativo

El estándar IEEE 802.15.2 describe algunos métodos para optimizar el rendimiento de las redes IEEE 802.15.1 y IEEE 802.11 mediante uno de los siguientes métodos: eliminación de interferencia adaptativa de dispositivo IEEE 802.11b y selección de paquetes adaptativa y programación de paquetes para los enlaces ACL.

Estos métodos no necesitan la colaboración entre la IEEE 802.11 y IEEE 802.15.1. Por consiguiente la categoría general pertenece a los mecanismos de convivencia no colaborativos. Adicional se proporcionan otros dos métodos tales como:

- Programación de paquetes para enlaces SCO.

- Salto de frecuencia adaptativo (AFH) para dispositivos IEEE 802.15.1[48].

El objetivo principal de los métodos de programación y la selección de paquetes adaptables es la implementación de la transmisión de acuerdo con las condiciones actuales del canal. Mientras el canal está controlado por la interferencia de la red IEEE 802.11b. PER (la tasa de error de paquete) será causada por colisiones entre los estándares IEEE 802.15.1 y IEEE 802.11.

Los diferentes tipos de paquete no obtienen la protección de FEC (corrección de errores hacia adelante), se ofrecería un rendimiento adecuado con la programación inteligente de paquetes. En los métodos mencionados se calcula con exactitud las condiciones del canal de manera oportuna, para la evaluación del canal se puede definir de la siguiente manera. Indicación de la intensidad de la señal recibida (RSSI), perfil de decodificación de verificación de error de encabezado (HEC), tasa de error de bit (BER), perfil PER y una combinación inteligente de estas técnicas [48].

En el estándar IEEE 802.15.2 contiene cinco mecanismos no colaborativos [48]. Dos de ellos colaboran una función de clasificación de canales. Los tres restantes obtienen una eliminación de interferencias. Un mecanismo basado en el proceso de señales en la capa física de la WLAN [48].

Los sistemas IEEE 802.15.1 manejan algunos tipos de paquetes con diferentes configuraciones, como la longitud del paquete y el grado de protección frente a errores utilizadas. Distinguiendo el mejor tipo de paquete de acuerdo con el estado del canal del siguiente salto de frecuencia, se puede alcanzar un excelente rendimiento de datos y de la red. De igual forma, al programar adecuadamente la transmisión de paquetes para que los dispositivos IEEE 802.15.1 transmitan mientras los saltos que están fuera de las frecuencias WLAN abandonen transmisión en la banda, la interferencia a los sistemas WLAN se puede disminuir y al mismo tiempo aumentar el rendimiento de los sistemas IEEE 802.15.1 [49].

Continuando con los sistemas IEEE 802.15.1 en el salto de frecuencia adaptable esta entre: el estado de conexión de los 79 canales con una velocidad nominal de 1600 saltos/s y el estado de consulta y búsqueda, que está alrededor de 3200 saltos/s. Una vez identificado los canales con interrupción, se puede cambiar la sucesión de saltos para evitar canales con interferencia. Esto depende del tipo de tráfico y el estado del canal, pues se crea una reasignación de frecuencia, para evitar o disminuir los efectos de la interferencia [50].

CAPITULO III

3. METODOLOGÍA

A continuación, se presenta la metodología que se ha utilizado para el desarrollo del presente trabajo de titulación. Se describen varios aspectos como el tipo de investigación, técnicas y procedimientos que se van a emplear para llevar a cabo la implementación de esta.

Tipo de investigación

En base a la orientación del trabajo de titulación, la investigación que se realiza es aplicada-descriptiva, aplicada porque el modelo de coexistencia e interferencia se implementara en el software MATLAB y descriptiva porque se analiza las variables obtenidas de la simulación en el software.

- **Aplicada:** debido a que la presente investigación se realiza el modelado de la interferencia WLAN en una red BLE.
- **Descriptiva:** se describirán e interpretarán las variables y resultados obtenidos del modelado. Se analizará parámetros como interferencia, probabilidad de colisión de la red WLAN, los dispositivos BLE maestro-esclavo que emplean canales sin problema para comunicarse entre sí y la tasa de éxito de los canales BLE.

Diseño de la investigación

- La presente investigación se considera experimental, porque se basa en el análisis y comprensión de los protocolos IEEE 802.11ah y Bluetooth LE, para realizar un modelado de la coexistencia e interferencia entre estándares.

Métodos de la investigación

Los métodos de investigación son fundamentales e indispensables para el desarrollo de un estudio de cualquier índole. El método muestra el camino que se seguirá a lo largo de la investigación.

Debido a que se trata de un proyecto de investigación sobre tecnologías ya existentes, como IEEE 802.11ah y Bluetooth LE, la estrategia seguida para la realización de esta investigación se basa en la búsqueda de varios estudios realizados por expertos en la materia con el objetivo de establecer la base para que mediante la experimentación de un modelo conseguir el objetivo. En la presente investigación se pretende utilizar los siguientes métodos.

Método científico: mismo que servirá para recolectar toda la información del modelo obtenido de la coexistencia e interferencia entre IEEE 802.11ah y Bluetooth LE.

Observación: permite leer y registrar los datos obtenidos de los resultados de la simulación de coexistencia e interferencia entre IEEE 802.11ah y Bluetooth LE.

Método analítico: permite tomar en cuenta los resultados que sean coherentes.

Técnicas de recolección de datos primarios y secundarios

Las técnicas de recolección de datos empleados en la presente investigación son:

Uso de Instrumentos: mediante el uso de software (detallados en la siguiente sección) se puede comprobar el modelo obtenido de la coexistencia e interferencia entre 802.11ah y Bluetooth LE.

Instrumentos de recolección de datos y simulación

Software:

- Se usará la caja de herramientas de comunicaciones de MATLAB, dentro de la cual se encuentra la librería para el protocolo Bluetooth (Communications Toolbox, library for the Bluetooth Protocol). Dentro de esta se encuentra la simulación de redes de malla y modelado de interferencia (Mesh Network Simulation and Interference modeling), que a su vez contiene la herramienta para el análisis de interferencia y coexistencia de redes WLAN y BLE.

Escenarios de pruebas

Mecanismo de coexistencia BLE-WLAN

Si existen diferentes tipos de redes inalámbricas operando en la misma banda de frecuencia sin licencia, es posible que dos redes diferentes interfieran entre sí. Esta interferencia puede provocar fallos de transmisión en ambas redes. No existe un algoritmo estandarizado para lograr la coexistencia de dos redes inalámbricas diferentes. Sin embargo, el estándar IEEE 802.15.2 especifica algunas prácticas recomendadas para lograr la coexistencia de redes inalámbricas de área personal (WPAN) con otros dispositivos inalámbricos que operan en bandas de frecuencia sin licencia.

Para esta investigación se ilustra un modelo de coexistencia BLE con interferencia de señal WLAN. La comunicación WLAN requiere un ancho de banda mínimo de 20 MHz, mientras que los dispositivos BLE solo requieren un ancho de banda de 2 MHz. WLAN utiliza un mecanismo de acceso al canal llamado acceso múltiple con detección de portadora con prevención de colisiones (CSMA / CA), mientras que los dispositivos BLE utilizan saltos de frecuencia. La interferencia se produce cuando la frecuencia de funcionamiento de los dispositivos BLE y WLAN se superponen. Para minimizar la interferencia se utilizan mecanismos de coexistencia. Los mecanismos de coexistencia se clasifican ampliamente en

estas dos categorías: colaborativo y no colaborativo. Para esta investigación se ilustra un mecanismo de coexistencia no colaborativo para dispositivos BLE con WLAN.

Descripción del modelo para la Coexistencia e Interferencia de BLE con WLAN

A continuación, se describe el algoritmo de comunicación de datos en BLE, interferencia WLAN y coexistencia utilizada para evitar la interferencia en esta investigación, además, en la Figura 2 y en la Tabla 4 se presenta el modelo de coexistencia BLE-WLAN y el algoritmo de clasificación de canales, respectivamente.

Comunicación en BLE: BLE define dos roles principales en la capa de enlace: el maestro y el esclavo. El maestro inicia la comunicación de datos y el esclavo responde al maestro. En esta investigación, el intercambio de paquetes BLE se modela entre un maestro y varios esclavos (configurables hasta 5, debido a que, es el número máximo que permite simular la caja de herramientas helperBLEDeviceModel de Matlab). En BLE, la comunicación de datos se produce solo durante eventos de conexión. Un evento de conexión es una secuencia recurrente (a intervalos regulares denominada intervalo de conexión) de intercambio de paquetes de datos entre un maestro y un esclavo. Todos los paquetes dentro de un evento de conexión se transmiten en el mismo canal de datos. Al comienzo de cada evento de conexión, el maestro inicia la comunicación con el esclavo respectivo. A partir de entonces, el esclavo responde al maestro con un paquete de datos. Si no hay datos para enviar, el esclavo responde con un paquete vacío. En esta investigación, solo se modela una transacción por evento de conexión. Un nuevo evento de conexión utiliza un nuevo canal de datos. El nuevo canal se selecciona en función del salto de canal adaptativo. Se utiliza un mapa de canales que indica canales buenos o malos al seleccionar un nuevo canal, mostrando así la capacidad de adaptación en el salto de canal.

Tráfico WLAN: el tráfico WLAN se agrega o elimina dinámicamente del modelo de acuerdo con las horas de inicio y finalización especificadas. Cada red WLAN está configurada con una probabilidad de colisión individual. Además, el nivel de interferencia de WLAN se configura para cada red WLAN para corromper las señales BLE en el canal respectivo. Para cada transmisión, se genera un número aleatorio entre 0 y 1. Si el número aleatorio generado es menor que la probabilidad de colisión, entonces la señal BLE de transmisión se corrompe al agregar las señales WLAN en ese canal. El tráfico WLAN generado se podrá modificar para IEEE 802.11ax o 802.11n utilizando la función wlanTraffic . Para esta investigación solo se utiliza canales WLAN de 20 MHz.

Coexistencia de BLE con WLAN: si el canal BLE seleccionado se ve afectado significativamente por la interferencia de WLAN en función de la probabilidad de colisión, la señal BLE transmitida se ve interferida por las señales de WLAN en ese canal. El dispositivo maestro clasifica periódicamente los canales esclavos como "buenos canales" o "malos canales", en función de las fallas de paquetes en ese canal. La información de clasificación de canales se almacena en forma de mapa de bits denominado mapa de canales. El mapa de bits es una matriz de unos y ceros que definen la clasificación del canal ("bueno" o "malo"). La función `classifyChannels` clasifica los canales BLE y almacena el mapa de bits generado. El maestro mantiene un mapa de canales diferente para cada esclavo. El mapa de canales actualizado se envía al esclavo. La periodicidad de la clasificación de canales se configura estableciendo la propiedad `Classification Interval` del objeto `helper BLE Channel Classification`.

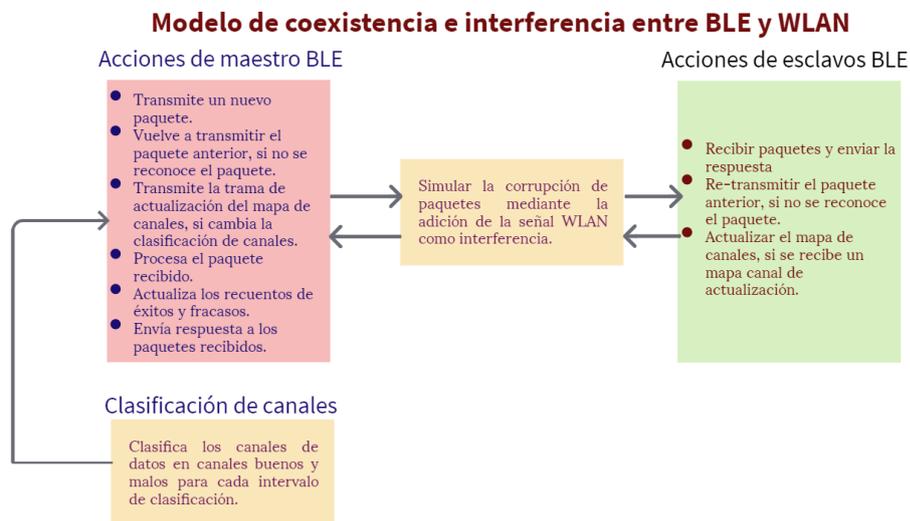


Figura 2. Modelo de coexistencia e interferencia entre BLE y WLAN.

Tabla 4. Clasificación de canales

Algoritmo 1. Clasificación de canales	
	Comparar la tasa de error de paquete (PER) con el umbral PER para cada canal BLE.
Paso 1	Si PER del canal > PER principal Marcar como canal defectuoso
	Comparar canales
Paso 2	Si número de buenos canales < mínimo número de buenos canales Si el método de clasificación (método basado en errores de paquetes de cada

	canal) de canales defectuosos se establece en "Restablecer todos los canales defectuosos"
	Marque todos los canales malos como buenos canales.
	Restablecer todas las estadísticas del canal excepto los valores recientes (10%).
	Comparar buenos canales
	Si el método de clasificación de canales defectuosos se establece como "Uso de indicaciones de energía"
Paso 3	Comparara para cada canal defectuoso, el tiempo de ocupación del canal con el valor umbral del tiempo de ocupación del canal.
	Si el tiempo de ocupación del canal es $<$ al umbral de tiempo de ocupación.
	Marcar como buen canal.
	Comparar
	Si el número de canales $<$ 2
Paso 4	Obtener 1 o 2 mejores canales de todos los canales malos y márkuelos como buenos canales para mantener un mínimo de 2 buenos canales.
	Seleccionar mejores canales en función del canal PER
Paso 5	Terminar

Los dispositivos BLE en estado inactivo, calculan el tiempo de ocupación del canal para todos los "canales defectuosos" mediante la detección de energía (ED) de las señales recibidas. Si el número actual de buenos canales es menor que el número preferido de buenos canales, los malos canales se clasifican nuevamente. Esta clasificación se basa en el tiempo de ocupación del canal cuando la propiedad `BadChannelClassificationMethod` se establece en "Uso de indicaciones de energía". Si la propiedad `BadChannel ClassificationMethod` se establece en "Restablecer todos los canales defectuosos", los canales se restablecen como canales buenos.

Hipótesis y operacionalización de variables

En esta sección se presenta la hipótesis de investigación, así como, las variables que intervienen en el problema de investigación, las cuales se detallan en la Tabla 5.

Tabla 5. Análisis de variables dependientes e independientes.

Variable dependiente	Concepto	Indicadores	Instrumentos
Simulación de coexistencia e interferencia de 802.11ah y Bluetooth LE	Los mecanismos de coexistencia son usados para minimizar la interferencia WLAN sobre las señales BLE.	Número de paquetes recibidos Número de paquetes perdidos Número de paquetes dañados Número de paquetes retransmitidos	Caja de herramientas de comunicaciones para el protocolo Bluetooth, WLAN y Microsoft Excel
Variable independiente	Concepto	Indicadores	
Interconexión de dispositivos de IoT	Agrupación e interconexión de dispositivos y objetos a través de una red, en dónde todos ellos podrían ser visibles e interactuar	Número de canales buenos Número de canales defectuosos Número de dispositivos conectados (esclavos)	

Elaborado por: Autor.

Hipótesis de investigación (Hi)

¿La simulación de coexistencia e interferencia de 802.11ah y Bluetooth LE facilitará la interconexión de dispositivos de IoT?

Hipótesis Nula (Ho)

¿La simulación de coexistencia e interferencia de 802.11ah y Bluetooth LE no facilitará la interconexión de dispositivos de IoT?

VARIABLE INDEPENDIENTE

Simulación de coexistencia e interferencia de 802.11ah y Bluetooth LE

VARIABLE DEPENDIENTE

Interconexión de dispositivos de IoT

Población y muestra

POBLACIÓN

La población es el conjunto de todos los elementos a ser evaluados, en la presente investigación la conforman los estándares de comunicación IEEE 802.11ah y Bluetooth LE, enfocados en brindar conectividad a los dispositivos de IoT.

MUESTRA

Para analizar el modelo de coexistencia e interferencia se realizó un muestreo aleatorio sistemático en base a investigaciones previas de pregrado y posgrado, así como, de revistas especializadas, tal como se demuestra en el estado del arte de esta investigación.

En base a lo anterior se encontraron dos tecnologías inalámbricas más adecuadas y actuales que se utilizan para brindar conectividad a dispositivos de IoT, siendo estas:

- 802.11ah
- Bluetooth LE.

CAPITULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En análisis de resultados se centra en cuantificar algunos indicadores como: número de paquetes recibidos, número de paquetes perdidos, número de paquetes dañados, número de canales buenos y número de canales defectuosos, del funcionamiento de la red Bluetooth LE y 802.11ah. Para lo cual, se configura una red BLE (ver Tabla 6 y Figura 3) que define dos roles principales, maestro-esclavo, donde, el maestro puede iniciar la comunicación de datos con el esclavo, empleando uno de los 39 canales. Así mismo, se configura la red WLAN con probabilidades de colisión, nivel de interferencia, hora de inicio y finalización de la interferencia de canal (ver Tabla 7).

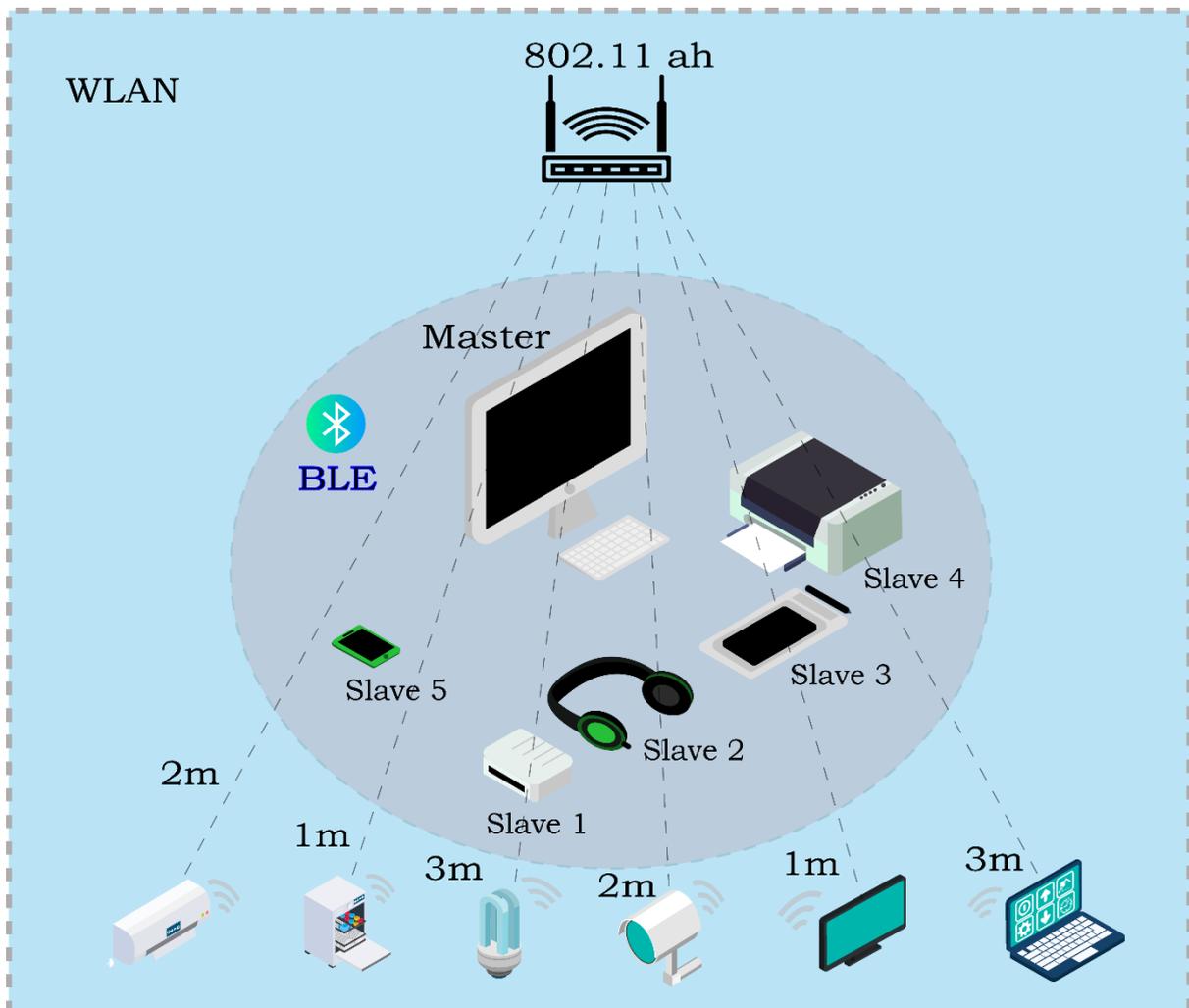


Figura 3. Escenario de prueba

Tabla 6. Parámetros de configuración BLE

Red Bluetooth LE	
Roles	Maestro esclavo
Canales	39
Frecuencia	2 MHz
Número de esclavos	1-5
Valor umbral de la tasa error (PER)	40
Periodicidad de clasificación canales	150
Número máximo de paquetes recibidos	4
Número mínimo de paquetes recibidos	4
Método de clasificación de canales defectuosos	Restablecer todos los canales defectuosos
Número preferido de buenos canales	30

Tabla 7. Modelo de tráfico WLAN

Red Bluetooth WLAN	
Número de redes WLAN que interfieren con la red BLE	6
Canales	[1, 5, 6, 12, 9, 8]
Frecuencia	2 MHz
Probabilidad	[0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8]
Hora de inicio de transmisión	[0, 0, 0, 200, 150]
Hora de fin de transmisión	[inf, 2100, inf, 2800, inf]
Nivel de potencia de señal WLAN	[1.20, 0.90, 0.85, 0.95, 0.70, 1.15]

En el primer escenario se considera un solo dispositivo con la probabilidad de colisión 0 (Figura 4), en este se observa que la tasa de éxito del intercambio de paquetes entre la red BLE es 100% en todos los canales, excepto el 21 que posee una tasa de éxito del 95%. Este resultado indica que la interferencia de las señales 802.11 ah tienen una repercusión casi nula en la red BLE, sin embargo, esto podría cambiar al variar la probabilidad de colisión de las ondas interferentes.

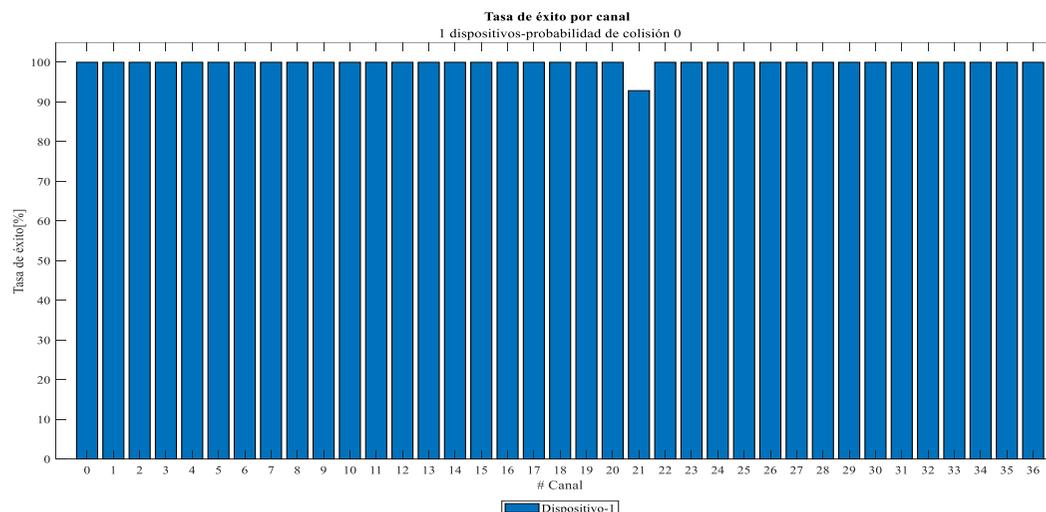


Figura 4. Escenario 1, un dispositivo con probabilidad de colisión 0.

En el segundo escenario se consideran dos dispositivos con la probabilidad de colisión 0.8 (Figura 5), en este se observa que la tasa de éxito del intercambio de paquetes oscila alrededor del 80% (esto no tiene relación con la probabilidad de colisión) en los mejores canales, esto se debe a que son canales no coincidentes para el envío de paquetes, es decir, que los dispositivos no usan el mismo canal simultáneamente. Sin embargo, existen canales donde las colisiones de paquetes aumentan y por consecuencia la tasa de éxito disminuye, situándose alrededor del 10%, estos canales son: 10, 16, 17, 18, 19, 20, 26 y 27, esto se debe a que los dispositivos intentan enviar paquetes por un mismo canal de forma simultánea, lo que produce una colisión. Este resultado indica que, al disponer de un número mayor de dispositivos en la red, la interferencia de

las señales 802.11 ah tienen una repercusión importante en la red BLE, esto se ve reflejado en la caída de la tasa de éxito a comparación del escenario 1.

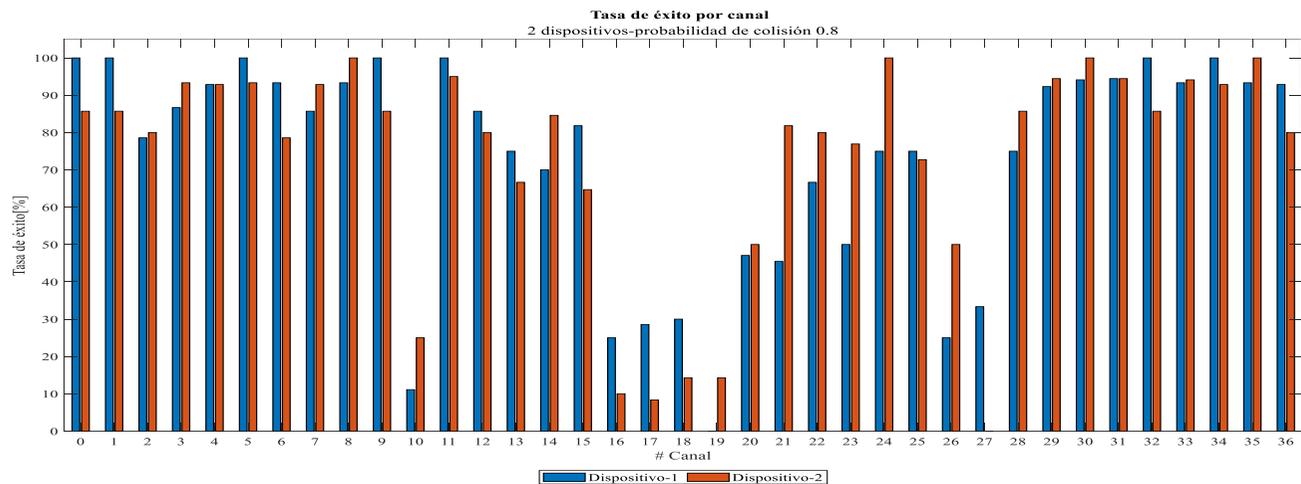


Figura 5. Escenario 2, dos dispositivos con probabilidad de colisión 0.8

En el tercer escenario se consideran tres dispositivos con la probabilidad de colisión 0.8 (Figura 6), en este se observa que la tasa de éxito del intercambio de paquetes oscila alrededor del 70% en los mejores canales, esto se debe a que son canales no coincidentes para el envío de paquetes, es decir, que los dispositivos no usan el mismo canal simultáneamente. Sin embargo, existen canales donde las colisiones de paquetes aumentan y por consecuencia la tasa de éxito disminuye, situándose alrededor del 10%, estos canales son: 10, 16, 17, 18, 19, 20, 26 y 27, esto se debe a que los dispositivos intentan enviar paquetes por un mismo canal de forma simultánea, lo que produce una colisión. Este resultado indica que, al disponer de un número mayor de dispositivos en la red, la interferencia de las señales 802.11 ah tienen una repercusión importante en la red BLE, esto se ve reflejado en la caída de la tasa de éxito a comparación del escenario 1 y 2.

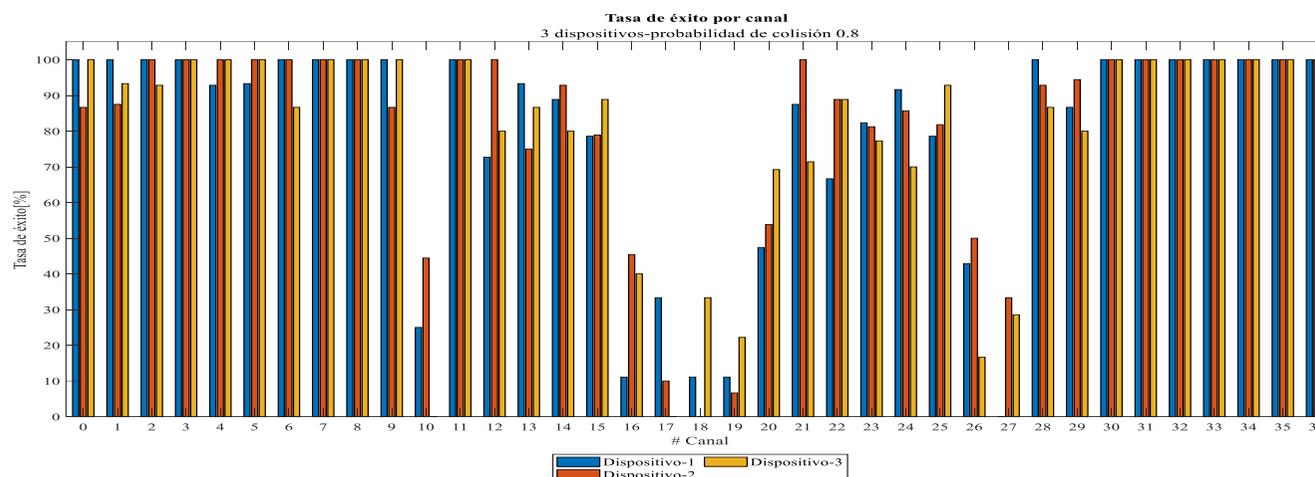


Figura 6. Escenario 3, tres dispositivos con probabilidad de colisión 0.8

En el cuarto escenario se consideran cuatro dispositivos con la probabilidad de colisión 0.8 (Figura 7), en este se observa que la tasa de éxito del intercambio de paquetes oscila alrededor del 60% en los mejores canales, esto se debe a que son canales no coincidentes para el envío de paquetes, es decir, que los dispositivos no usan el mismo canal simultáneamente. Sin embargo, existen canales donde las colisiones de paquetes aumentan y por consecuencia la tasa de éxito disminuye, situándose alrededor del 9%, estos canales son: 10, 16, 17, 18, 19, 20, 26 y 27, esto se debe a que los dispositivos intentan enviar paquetes por un mismo canal de forma simultánea, lo que produce una colisión. Este resultado indica que, al disponer de un número mayor de dispositivos en la red, la interferencia de las señales 802.11 ah tienen una repercusión importante en la red BLE, esto se ve reflejado en la caída de la tasa de éxito a comparación del escenario 1, 2 y 3.

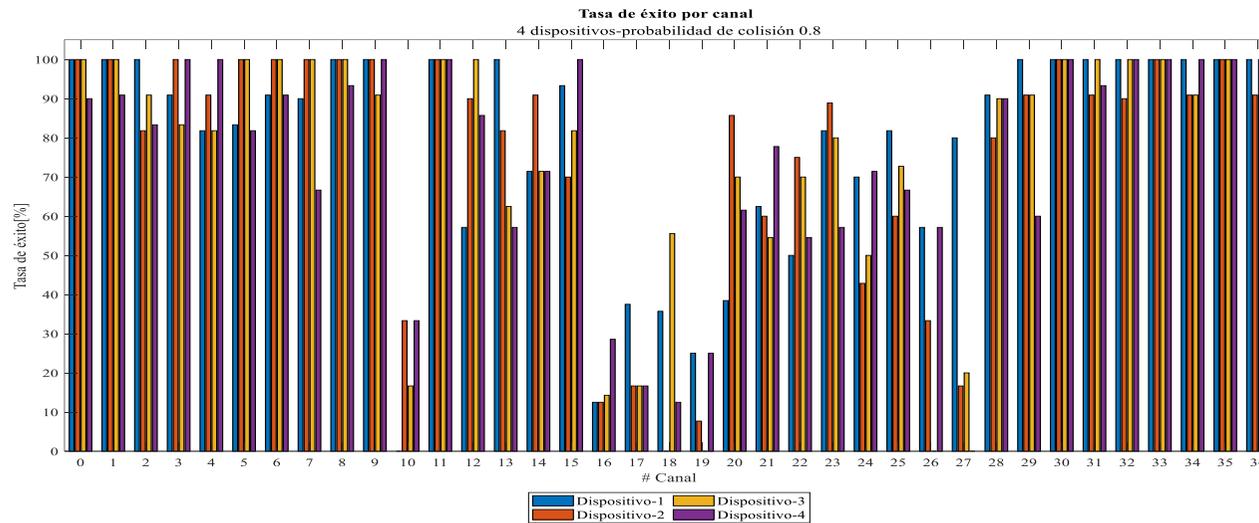


Figura 7. Escenario 4, cuatro dispositivos con probabilidad de colisión 0.8

En el quinto escenario se consideran cinco dispositivos con la probabilidad de colisión 0.8 (Figura 8), en este se observa que la tasa de éxito del intercambio de paquetes oscila alrededor del 50% en los mejores canales, esto se debe a que son canales no coincidentes para el envío de paquetes, es decir que los dispositivos no usan el mismo canal simultáneamente. Sin embargo, existen canales donde las colisiones de paquetes aumentan y por consecuencia la tasa de éxito disminuye, situándose alrededor del 9%, estos canales son: 10, 16, 17, 18, 19, 26 y 27, esto se debe a que los dispositivos intentar enviar paquetes por un mismo canal de forma simultánea, lo que produce una colisión. Este resultado indica que, al disponer de un número mayor de dispositivos en la red, la interferencia de las señales 802.11 ah tienen una repercusión importante en la red BLE, esto se ve reflejado en la caída de la tasa de éxito a comparación del escenario 1, 2, 3 y 4.

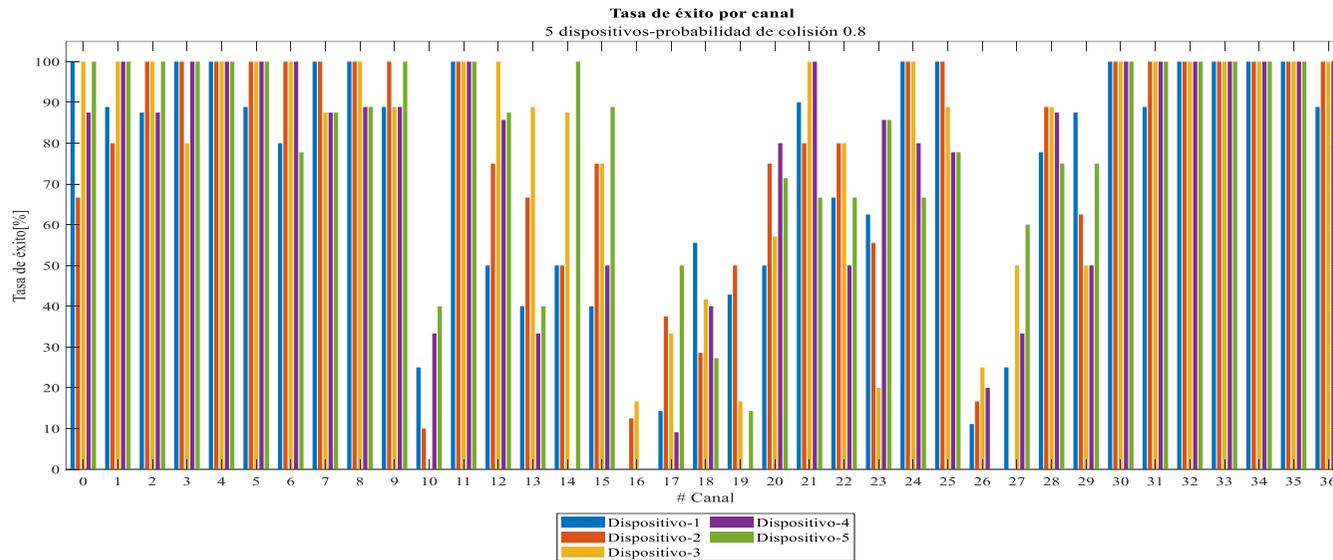


Figura 8. Escenario 5, cinco dispositivos con probabilidad de colisión 0.8

En contraste, a los resultados antes descritos es posible decir que la colisión de paquetes aumenta de forma significativa, a medida que existen una mayor cantidad de dispositivos conectados a la red, esto provoca que la tasa de éxito de la transmisión de paquetes disminuya considerablemente.

En las Figuras 9, 10 y 11, se presentan los resultados del número de paquetes transmitidos, el número de paquetes fallidos y el estado, de cada uno de los canales empleados en la simulación. Para lo cual, se eligió, como ejemplo, los resultados del escenario 3, debido a que, se trata de un punto medio en cuanto al número de dispositivos, pues ante la presencia de varios dispositivos se puede verificar la coexistencia de estándares, así como la interferencia. Los parámetros se cuantifican para cada uno de los dispositivos y para cada clasificación. Asimismo, los resultados de los demás escenarios se adjuntan como anexos.

Para la clasificación 1, en primer lugar, se ubica el dispositivo 2, que posee 135 paquetes recibidos, 29 paquetes fallidos y 33 canales buenos. En segundo lugar, se ubica el dispositivo 3 con 131 paquetes recibidos, 27 paquetes fallidos y 30 canales buenos. Por último, el dispositivo 1 presente 129 recibidos, 24 paquetes fallidos y 33 canales buenos.

Para la clasificación 2, en primer lugar, se ubica el dispositivo 2, que posee 271 paquetes recibidos, 49 paquetes fallidos y 37 canales buenos. En segundo lugar, se ubica el dispositivo 1 con 268 paquetes recibidos, 58 paquetes fallidos y 37 canales buenos. Por último, el dispositivo 3 presente 267 recibidos, 56 paquetes fallidos y 37 canales buenos.

Para la clasificación 3, en primer lugar, se ubica el dispositivo 2, que posee 380 paquetes recibidos, 49 paquetes fallidos y 31 canales buenos. En segundo lugar, se ubica el dispositivo 1 con 373 paquetes recibidos, 43 paquetes fallidos y 31 canales buenos. Por último, el dispositivo 3 presente 370 recibidos, 51 paquetes fallidos y 31 canales buenos.

Canales	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Indicador	
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 1	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	5	4	4	3	4	2	4	2	2	2	0	4	3	3	2	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	129
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	0	3	1	1	1	4	1	3	2	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	33
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 2	8	8	8	8	8	9	8	8	8	8	4	12	5	8	12	8	4	5	5	5	11	2	6	8	6	7	4	2	8	9	8	8	8	8	8	8	8	268	
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	0	3	1	2	3	4	3	4	5	10	1	5	3	1	3	2	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	58	
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	37	
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 3	12	12	12	12	12	13	12	12	12	12	5	16	5	12	16	12	6	5	4	5	6	6	6	12	10	6	4	6	12	13	13	12	12	12	12	12	12	373	
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 3	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	4	0	0	1	2	3	5	2	4	4	2	1	0	3	1	1	3	6	0	2	0	0	0	0	0	0	46		
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	31	
Paquetes Rx totales esclavo-maestro	14	15	14	15	14	15	15	14	15	14	8	20	11	15	18	14	9	12	9	19	8	15	17	12	14	7	6	15	15	15	14	16	17	14	15	14	503		
Total de paquetes Rx fallidos esclavo-maestro	0	0	0	0	1	1	0	0	0	6	0	3	1	2	3	8	8	8	8	10	1	5	3	1	3	4	6	0	2	0	0	0	0	0	0	0	84		

Figura 9. Resultados de simulación, escenario3, dispositivo 1.

Canal	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Indicador
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 1	5	4	4	4	4	5	4	4	4	5	5	4	4	5	4	4	5	3	3	3	3	1	0	3	4	4	1	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	135
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	3	1	0	4	3	3	3	1	0	0	1	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	29
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	33
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 2	9	9	8	8	8	9	8	8	8	9	5	12	8	6	8	12	5	6	4	10	7	2	1	7	8	5	3	3	8	11	8	8	8	8	8	8	8	271
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	3	1	4	4	5	4	9	4	0	0	1	0	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	49	
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	37	
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 3	13	13	12	12	12	13	12	12	12	13	5	16	12	4	12	17	5	5	6	6	5	6	5	11	12	5	6	6	11	16	13	12	12	12	12	12	380	
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 3	2	2	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	0	1	4	2	4	6	6	2	0	1	3	2	0	3	4	1	1	0	0	0	0	0	0	49	
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	31	
Paquetes Rx totales esclavo-maestro	15	16	14	15	14	15	14	14	15	15	9	20	14	12	14	19	11	10	10	15	13	10	9	16	14	11	6	14	18	15	14	16	17	14	15	14	503	
Total de paquetes Rx fallidos esclavo-maestro	2	2	0	0	0	0	0	0	0	2	5	0	0	3	1	4	6	9	10	14	6	0	1	3	2	2	3	4	1	1	0	0	0	0	0	0	81	

Figura 10. Resultados de simulación, escenario3, dispositivo 2.

Canal	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Índice		
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 1	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	5	4	4	4	4	3	4	3	4	1	2	1	0	4	4	4	1	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	131
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	2	0	2	1	4	3	3	1	0	0	0	1	2	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	30
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 2	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	5	12	4	8	4	12	4	8	5	5	7	6	1	11	4	7	3	4	8	4	8	12	8	8	8	8	12	267		
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	2	2	2	2	4	8	4	5	4	3	0	3	2	1	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	56	
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	37	
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 3	12	12	12	12	13	13	12	12	12	6	16	5	12	5	16	5	5	4	5	5	5	5	5	17	5	12	6	4	12	5	13	16	12	12	12	16	370			
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 3	0	1	1	0	0	0	2	0	0	0	6	0	1	2	1	2	2	5	2	3	0	2	1	5	2	1	5	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	51		
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	31	
Paquetes Rx totales esclavo-maestro	14	15	14	15	14	15	14	15	14	10	20	10	15	10	18	10	12	9	13	14	9	22	10	14	6	7	15	10	15	18	16	17	14	15	18	501				
Total de paquetes Rx fallidos esclavo-maestro	0	1	1	0	0	0	2	0	0	0	10	0	2	2	2	6	12	6	7	4	4	1	5	3	1	5	5	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	85		

Figura 11. Resultados de simulación, escenario3, dispositivo 3.

Para la comprobación de la hipótesis de investigación se dará a la variable independiente X los siguientes valores:

$X = \text{estándares para brindar conectividad a dispositivos de IoT}$

$X_1 = 802.11 \text{ ah}$

$X_2 = \text{Bluetooth LE}$

A través de los cuales se determinará el impacto sobre la variable dependiente $Y = \text{Interconexión de dispositivos de IoT}$. Es así como, en la Tabla 9 se presentan los resultados obtenidos para la variable dependiente, aplicado con varios dispositivos conectados a la red.

La interpretación de la codificación, que se presenta en la Tabla 8, corresponde a una calificación cualitativa, donde los criterios se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Ponderación cualitativa

No existe	0
Malo	1
Bueno	2
Muy bueno	3
Excelente	4

Tabla 9. Modelo de tráfico WLAN

Variable independiente ↓	Variable dependiente →	Interconexión de dispositivos de IoT																								
		1 dispositivo					2 dispositivos					3 dispositivos					4 dispositivos					5 dispositivos				
Simulación de coexistencia e interferencia de 802.11 ah y Bluetooth LE		0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
	Indicador																									
	Número de paquetes recibidos					X					X					X					X					X
	Número de paquetes perdidos					X					X					X					X					X
	Número de paquetes dañados					X					X					X					X					X
802.11 ah y Bluetooth LE	Número de paquetes retransmitidos					X					X					X					X					X
	Número de canales buenos					X					X					X					X					X
	Número de canales defectuosos					X					X					X					X					X
Total 802.11 ah y Bluetooth LE						6					2	2	2		2	2	2		3	3		1	2	3		

La prueba chi-cuadrado o χ^2 mide la relación entre la variable dependiente e independiente. Para lo cual, se considera la hipótesis nula H_0 y la hipótesis de investigación H_1 , presentada con anterioridad. Por lo cual se procede a elaborar una tabla de contingencia (ver Tabla 10), esta contiene las frecuencias observadas para las dos variables en estudio: Simulación de coexistencia e interferencia de 802.11ah y Bluetooth LE, e Interconexión de dispositivos de IoT.

Tabla 10. Contingencia con las frecuencias observadas

	802.11 ah y Bluetooth LE					Total
	1	2	3	4	5	
Interconexión óptima de dispositivos de IoT	6	4	4	3	3	20
Interconexión media de dispositivos de IoT	0	2	2	3	3	10
Interconexión nula de dispositivos de IoT	0	0	0	0	0	0
Total	6	6	6	6	6	

Por otro lado, se calcula las frecuencias esperadas (ver Tabla 11), estas constituyen los valores que se esperarían encontrar si las variables no estuvieran relacionadas. La prueba chi-cuadrado parte del supuesto de “no relación entre las variables” y se evaluará si es cierto o no, para lo cual, se analiza si las frecuencias observadas son diferentes de lo que pudiera esperarse en caso de ausencia de correlación.

Tabla 11. Frecuencias esperadas

	802.11 ah y Bluetooth LE					Total
	1	2	3	4	5	
Interconexión óptima de dispositivos de IoT	9.23	9.23	9.23	9.23	9.23	46.2
Interconexión media de dispositivos de IoT	4.62	4.62	4.62	4.62	4.62	23.1
Interconexión nula de dispositivos de IoT	0	0	0	0	0	0
Total	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	

Asimismo, se determinan los grados de libertad mediante la siguiente expresión.

$$Gl = (3 - 1)(5 - 1) = 8$$

Por otro lado, de la tabla de distribución de chi-cuadrado se elige un nivel de confianza $\alpha = 0,05$, y juntamente con los grados de libertad obtenidos en el cálculo anterior, se obtiene un $\chi_{teórico}^2$ de 21.95. Asimismo, el chi-cuadrado calculado en esta investigación se presenta en la Tabla 12.

Tabla 12. Cálculo de χ^2

802.11 ah y Bluetooth LE					
	1	2	3	4	5
Interconexión óptima de dispositivos de IoT	1.13	2.96	2.96	4.21	4.21
Interconexión media de dispositivos de IoT	4.62	1.48	1.48	0.57	0.57
Interconexión nula de dispositivos de IoT	0	0	0	0	0
Total, de la tabla de χ^2: 24.2					

Por último, se tiene que el $\chi^2_{calculado} = 24.2$ es mayor que el $\chi^2_{teórico} = 21.95$, por lo que, se acepta la hipótesis H_1 . En otras palabras, se acepta la hipótesis de investigación, esto implica que la simulación de coexistencia e interferencia de 802.11ah y Bluetooth LE facilitará la interconexión de dispositivos de IoT.

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES

El protocolo IEEE 802.11 ah es el único que opera en la banda ISM por debajo del 1 GHz. Además, los canales operativos se pueden configurar con varios anchos de banda, donde las frecuencias de 1 y 2 MHz se destinan de forma prioritaria para aplicaciones de IoT. También, algunos parámetros relevantes, que afectan al funcionamiento del estándar, son: régimen reglamentario entre zonas, la velocidad del canal y el algoritmo de adaptación del enlace. Por otro lado, una de las características más importantes de este protocolo es que posee mecanismo mejorados de ahorro de energía y MAC, el cual utiliza CSMA / CA.

El estándar BLE se emplea para comunicaciones de corto alcance y opera en una banda de frecuencia de 2.4 GHz en un espectro disponible de 40 canales de 1 MHz. Asimismo, el estándar puede alcanzar una velocidad de transmisión de 1 MHz, cuando emplea la codificación de desplazamiento por frecuencia gaussiana. Por otro lado, la característica más importante de este estándar es el consumo de energía relativamente bajo, esto se logra mediante una arquitectura servidor-cliente, donde los periféricos poseen un mínimo conjunto de responsabilidades, por lo que se ocupan con cálculos complejos.

Al implementar, de forma simultánea, dispositivos que operan en las mismas bandas de frecuencia se genera interferencia. Sin embargo, existen el estándar 802.15.2 que ofrece un mecanismo de coexistencia, para dispositivos que operar sobre una misma banda de frecuencia sin licencia.

El estándar IEEE 802.15.2 describe algunos mecanismos de coexistencia, los cuales se pueden aplicar para las redes WLAN y WPAN. Estos mecanismos se dividen en dos clases: colaborativas y no colaborativas. El mecanismo de coexistencia colaborativa se aplica cuando existe un enlace de comunicación entre las redes WLAN y WPAN, mientras que, el mecanismo de coexistencia no colaborativa no requiere ningún enlace de comunicación.

Los estándares IEEE 802.11b y IEEE 802.15.1 funcionan en la misma banda de frecuencia de 2.4 GHz sin licencia, esto implica que existe una interferencia mutua entre los dos sistemas inalámbricos y por consecuencia se produce una degradación grave del rendimiento.

Los resultados obtenidos de la simulación muestran que la colisión de paquetes aumenta de forma significativa, a medida que existen una mayor cantidad de dispositivos

conectados a la red, lo cual produce que los paquetes que se envían por los canales fallen y no lleguen a su destino, afectando de manera directa a la tasa de éxito de la transmisión de paquetes, pues, disminuye considerablemente.

La simulación de coexistencia e interferencia de 802.11ah y Bluetooth LE facilitará la interconexión de dispositivos de IoT, como se demostró en la hipótesis chi cuadrado. Esto implica que, este tipo de estudios son de gran utilidad para el diseño previo a una implementación de una red que contenga dispositivos, que funcionan con diversos estándares.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] A. Nikoukar, S. Raza, A. Poole, M. Gunes, and B. Dezfouli, *Low-power wireless for the internet of things: Standards and applications*, vol. 6. 2018.
- [2] V. Baños-Gonzalez, M. S. Afaqui, E. Lopez-Aguilera, and E. Garcia-Villegas, “IEEE 802.11ah: A technology to face the IoT challenge,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 11, 2016, doi: 10.3390/s16111960.
- [3] M. R. Palattella, “Internet of Things in the 5G Era : Enabling Technologies and Business Models Internet of Things (IoT) definition,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, no. December 2015, pp. 1–9, 2015, [Online]. Available: https://orbilu.uni.lu/bitstream/10993/24796/1/main_jsac.pdf.
- [4] S. Cheruvu, A. Kumar, N. Smith, and D. M. Wheeler, *Demystifying Internet of Things Security*. 2020.
- [5] Bluetooth Special Interest Group, “Specification of the Bluetooth System Covered Core Package Version 4.2,” 2014.
- [6] R. G. Protillo, “Estudio en detalle y evaluación de protocolo BLE Mesh,” Universidad Oberta de Catañunya, 2018.
- [7] V. Hugo, “Contributions to IEEE 802 . 11-based long range communications.” pp. 1–109, 2020.
- [8] J. M. Ocampo Ocampo, “Análisis de factibilidad del diseño de radio enlace aplicando tecnología WRAN para brindar servicio de datos en la parroquia Teniente Hugo Ortíz (Pastaza).,” Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2019.
- [9] K. Cho, G. Park, W. Cho, J. Seo, and K. Han, “Performance analysis of device discovery of Bluetooth Low Energy (BLE) networks,” *Comput. Commun.*, vol. 81, pp. 72–85, 2016, doi: 10.1016/j.comcom.2015.10.008.
- [10] MathWorks, “Modelado estadístico de la interferencia WLAN en la red BLE,” 2020. .
- [11] Keysight Technologies, “How to Ensure IoT Devices Work in Their Intended Environment,” 2018.
- [12] J. Ding, M. Nemati, C. Ranaweera, and J. Choi, “IoT connectivity technologies and applications: A survey,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 67646–67673, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2985932.
- [13] Y. Liu, J. Guo, P. Orlik, Y. Nagai, K. Watanabe, and T. Sumi, “Coexistence of 802.11ah and 802.15.4g networks,” *2018 IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf.*, pp. 1–

6, 2018.

- [14] M. Saelens, J. Hoebeke, A. Shahid, and E. De Poorter, “Impact of EU duty cycle and transmission power limitations for sub-GHz LPWAN SRDs: an overview and future challenges,” *Eurasip J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2019, no. 1, 2019, doi: 10.1186/s13638-019-1502-5.
- [15] A. Šljivo *et al.*, “Performance evaluation of IEEE 802.11ah networks with high-throughput bidirectional traffic,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 2, pp. 1–28, 2018, doi: 10.3390/s18020325.
- [16] M. Shafiq *et al.*, “Multiple access control for cognitive radio-based IEEE 802.11ah networks,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 7, pp. 1–28, 2018, doi: 10.3390/s18072043.
- [17] L. Tian, S. Santi, A. Seferagić, J. Lan, and J. Famaey, “Wi-Fi HaLow for the Internet of Things: An up-to-date survey on IEEE 802.11ah research,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 182, no. March, 2021, doi: 10.1016/j.jnca.2021.103036.
- [18] F. Veisi, M. Nabi, and H. Saidi, “Coexistence Analysis of Multiple Asynchronous IEEE 802.15.4 TSCH-Based Networks,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 150573–150585, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3016770.
- [19] NXP Semiconductors, “KW41Z IEEE 802.15.4 and BLE Coexistence Performance.” pp. 1–12, 2018.
- [20] B. Pang, K. T’jonck, T. Claeys, D. Pissoort, H. Hallez, and J. Boydens, “Bluetooth low energy interference awareness scheme and improved channel selection algorithm for connection robustness,” *Sensors*, vol. 21, no. 7, 2021, doi: 10.3390/s21072257.
- [21] H. Hajizadeh, M. Nabi, M. Vermeulen, and K. Goossens, “Coexistence Analysis of Co-Located BLE and IEEE 802.15.4 TSCH Networks,” *IEEE Sens. J.*, vol. 21, no. 15, pp. 17360–17372, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3077526.
- [22] W. Kassab and K. A. Darabkh, “A–Z survey of Internet of Things: Architectures, protocols, applications, recent advances, future directions and recommendations,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 163, no. February, p. 102663, 2020, doi: 10.1016/j.jnca.2020.102663.
- [23] P. K. Verma *et al.*, “Machine-to-Machine (M2M) communications: A survey,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 66, pp. 83–105, 2016, doi: 10.1016/j.jnca.2016.02.016.
- [24] M. Elkhodr, S. Shahrestani, and H. Cheung, “Emerging Wireless Technologies in

- the Internet of Things : A Comparative Study,” *Int. J. Wirel. Mob. Networks*, vol. 8, no. 5, pp. 67–82, 2016, doi: 10.5121/ijwmn.2016.8505.
- [25] IEEE Computer Society, “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs),” *IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006)*, vol. 2011, no. September, pp. 1–314, 2011, doi: 10.1109/ieeestd.2011.6012487.
- [26] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, “Low Power Wide Area Networks: An Overview,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2652320.
- [27] U. E, I. C, N. O, and O. D, “State of Internet of Things (IoT) Network and Rising Issues: A Review,” vol. 3, no. 3, pp. 162–172, 2021, doi: <https://doi.org/10.37933/nipes/3.3.2021.16>.
- [28] D. Dobrilovic, M. Mazalica, and G. Gecin, “Experience in measuring Wi-Fi to ZigBee interference using open-source hardware,” *CEUR Workshop Proc.*, vol. 2913, pp. 47–59, 2021, doi: 10.47350/iccs-de.2021.04.
- [29] G. Cuzco, “Análisis de la coexistencia de redes Wi-fi y sistemas de posicionamiento en tiempo real para el tráfico de datos y el posicionamiento de objetos,” Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2018.
- [30] H. Pirayesh, P. K. Sangdeh, and H. Zeng, “Coexistence of Wi-Fi and IoT Communications in WLANs,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 8, pp. 7495–7505, 2020, doi: 10.1109/JIOT.2020.2986110.
- [31] V. Baños-Gonzalez, M. S. Afaqui, E. Lopez-Aguilera, and E. Garcia-Villegas, “IEEE 802.11ah: A technology to face the IoT challenge,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 11, pp. 1–20, 2016, doi: 10.3390/s16111960.
- [32] L. Tian, S. Santi, A. Seferagić, J. Lan, and J. Famaey, “Wi-Fi HaLow for the Internet of Things: An up-to-date survey on IEEE 802.11ah research,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 182, 2021, doi: 10.1016/j.jnca.2021.103036.
- [33] A. Montes and L. Camacho, “Telemetría a través de redes de área extensa de baja potencia (LPWA) y en coexistencia con el internet de las cosas (IoT),” *Espec. en Telecomunicaciones Móviles*, pp. 1–8, 2019, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11349/16025>.
- [34] IEEE Computer Society, “IEEE Standard for Information technology — Telecommunications and information exchange between systems Local and

- metropolitan area networks — Specific requirements Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specificati.” IEEE, 2016.
- [35] P. N. Borza, M. Machedon-Pisu, and F. Hamza-Lup, “Design of wireless sensors for iot with energy storage and communication channel heterogeneity,” 2019.
- [36] M. Qutab, “Enhancements and challenges in IEEE 802.11 ah a Sub-Gigahertz Wi-fi for IoT applications,” Tampere University of Technology, 2016.
- [37] B. Badihi, L. F. Del Carpio, P. Amin, A. Larmo, M. Lopez, and D. Denteneer, “Performance evaluation of IEEE 802.11ah actuators,” *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2016-July, pp. 5–9, 2016, doi: 10.1109/VTCSpring.2016.7504414.
- [38] S. Đurašević and U. Pešović, “Channel selection in 2.4 GHz ISM band for IEEE 802.15.4 networks Slađana,” in *54th international scientific conference on information, communication and energy systems and technologies*, 2019, pp. 27–29.
- [39] A. Del Campo, L. Cintoni, S. Spinsante, and E. Gambi, “Analysis and tools for improved management of connectionless and connection-oriented BLE devices coexistence,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 4, 2017, doi: 10.3390/s17040792.
- [40] L. F. Del Carpio, P. Di Marco, P. Skillermark, R. Chirikov, and K. Lagergren, “Comparison of 802.11ah, BLE and 802.15.4 for a Home Automation Use Case,” *Int. J. Wirel. Inf. Networks*, vol. 24, no. 3, pp. 243–253, 2017, doi: 10.1007/s10776-017-0355-2.
- [41] J. Lustig, “Coexistence Between BLE and IEEE 802.15.4 Networks,” KTH Vetenskap Och Konst, Sweden, 2018.
- [42] K. Ghaboosi, Y. Xiao, M. Latva-Aho, and B. H. Khalaj, “Overview of IEEE 802.15.2: Coexistence of Wireless Personal Area Networks with Other Unlicensed Frequency Bands Operating Wireless Devices,” *Emerg. Wirel. LANs, Wirel. PANs, Wirel. MANs IEEE 802.11, IEEE 802.15, 802.16 Wirel. Stand. Fam.*, pp. 135–150, 2008, doi: 10.1002/9780470403686.ch6.
- [43] R. Natarajan, P. Zand, and M. Nabi, “Analysis of coexistence between IEEE 802.15.4, BLE and IEEE 802.11 in the 2.4 GHz ISM band,” *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 6025–6032, 2016, doi: 10.1109/IECON.2016.7793984.
- [44] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, “Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE

- Std 802.11-2016,” *IEEE Std 802.11-2016 (Revision IEEE Std 802.11-2012)*, vol. 2016, pp. 1–3534, 2013, [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7786995/>.
- [45] E. De Poorter *et al.*, “Sub-GHz LPWAN Network Coexistence, Management and Virtualization: An Overview and Open Research Challenges,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 95, no. 1, pp. 187–213, 2017, doi: 10.1007/s11277-017-4419-5.
- [46] A. Nikoukar, S. Raza, A. Poole, M. Gunes, and B. Dezfouli, “Low-power wireless for the internet of things: Standards and applications,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 67893–67926, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2879189.
- [47] IEEE, “Estimation of Packet Error Rate Caused by Interference using Analytic Techniques – A Coexistence Assurance Methodology.” 2005.
- [48] L. S. Committee IEEE, “IEEE Draft Recommended Practice for Information Technology Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks Specific Requirements-Part 15.2: Coexistence of Wireless Personal Area Networks With Other Wireless,” *IEEE Spectr.*, vol. 13, no. 5, pp. 108–108, 2013, doi: 10.1109/mspec.1976.6369202.
- [49] Y. Nagai, T. Sumi, J. Guo, P. Orlik, and H. Mineno, “Ieee 802.19.3 standardization for coexistence of ieee 802.11ah and ieee 802.15.4g systems in sub-1 ghz frequency bands,” *J. Inf. Process.*, vol. 29, no. June, pp. 465–477, 2021, doi: 10.2197/IPSJJIP.29.465.
- [50] A. M. Mamadou and G. Chalhoub, “Enhancing the CSMA/CA of IEEE 802.15.4 for better coexistence with IEEE 802.11,” *Wirel. Networks*, vol. 27, no. 6, pp. 3903–3914, 2021, doi: 10.1007/s11276-021-02691-2.

ANEXOS

Tasa de éxito por canal

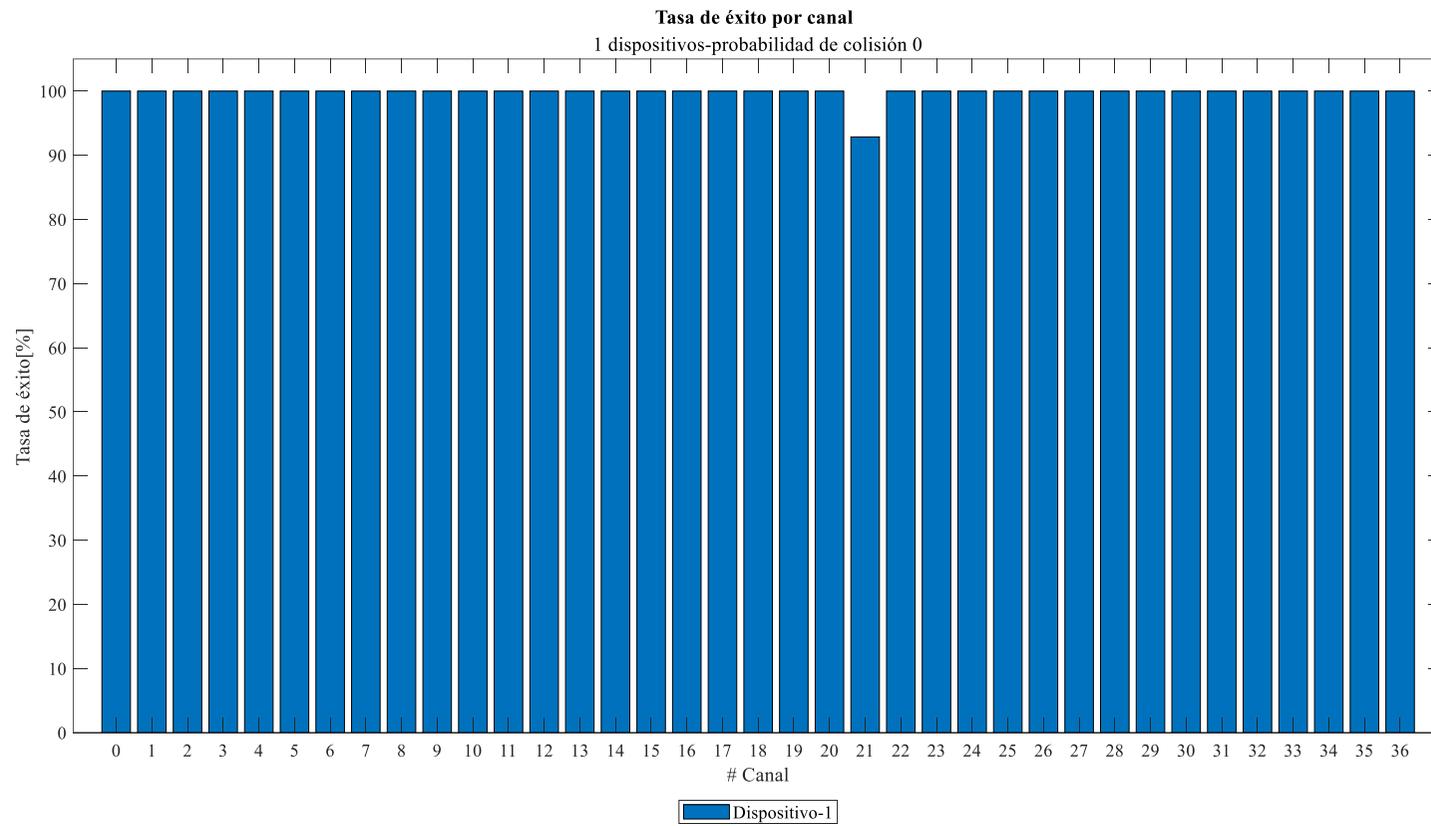


Figura 12. Escenario 1, un dispositivo con probabilidad de colisión 0

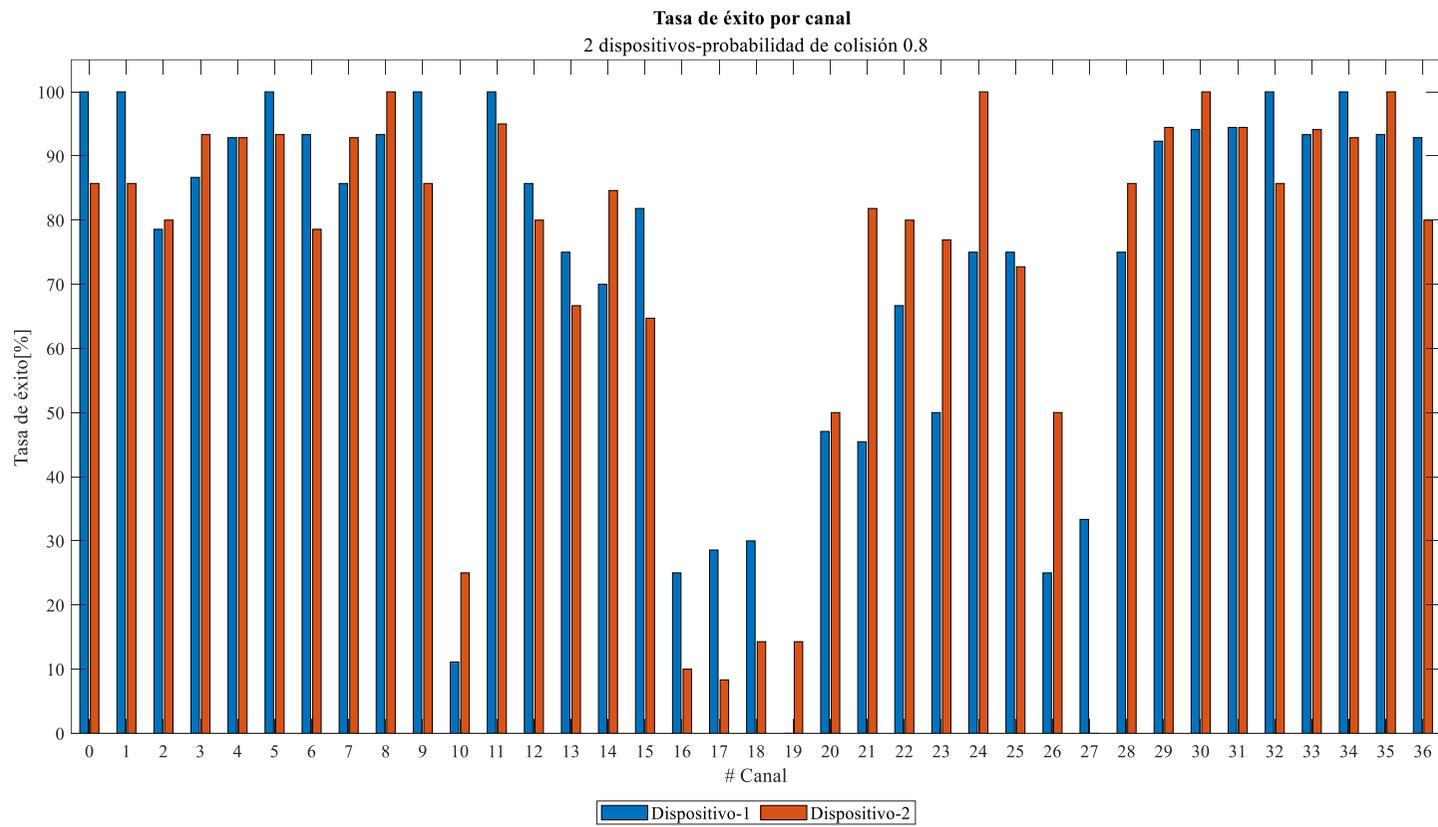


Figura 13. Escenario 2, dos dispositivos con probabilidad de colisión 0.8

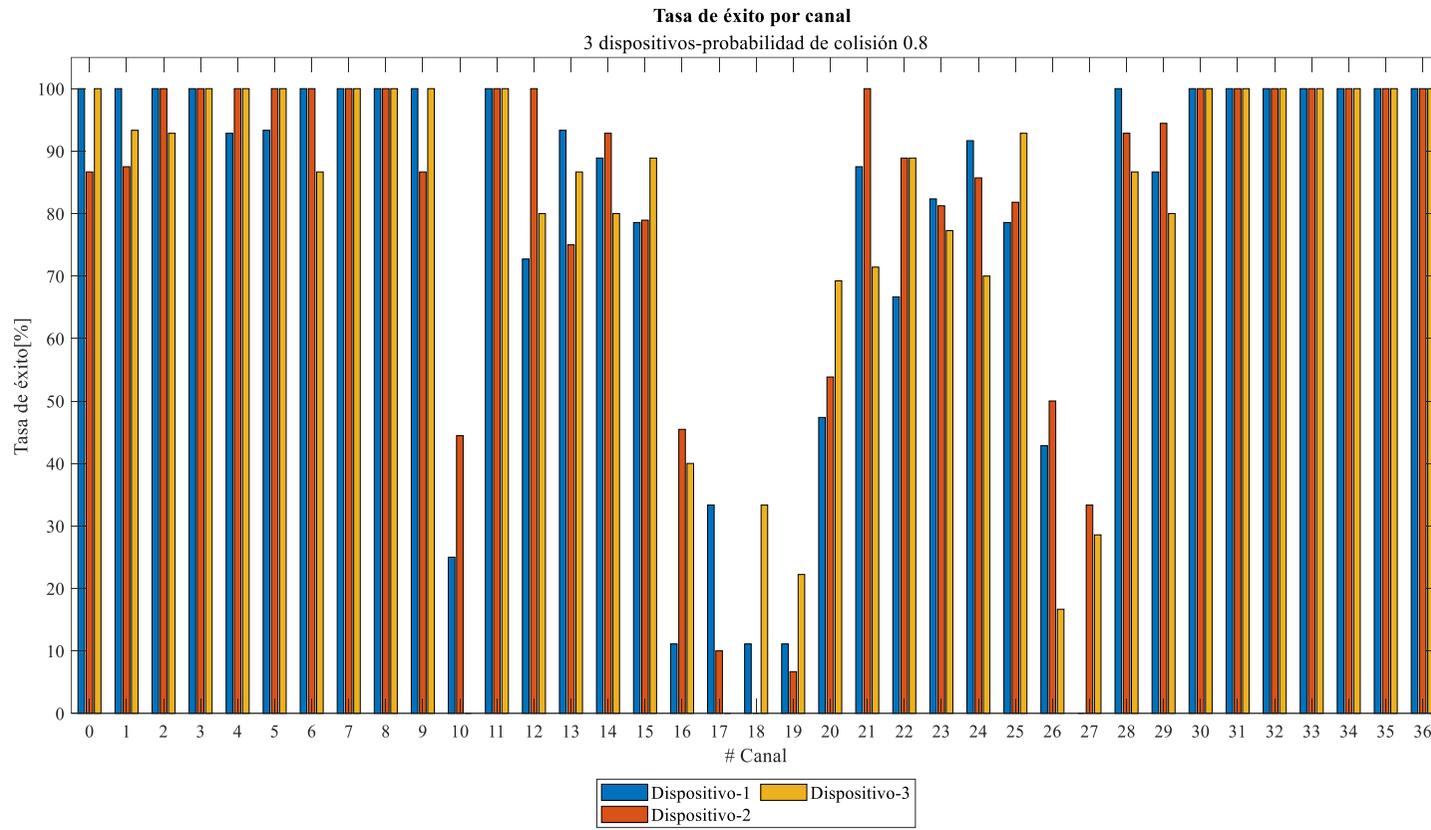


Figura 14. Escenario 3, tres dispositivos con probabilidad de colisión 0.8

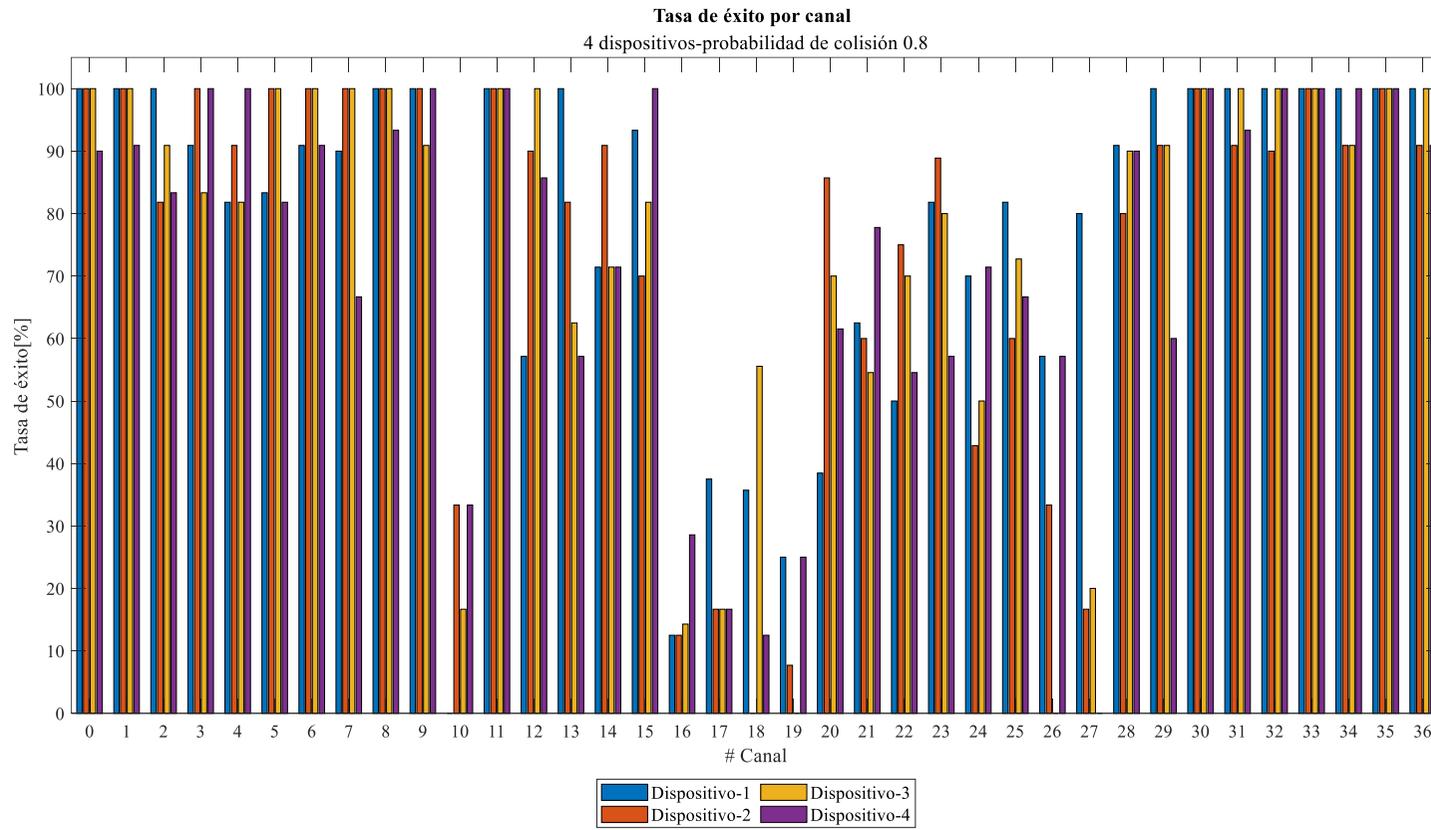


Figura 15. Escenario 4, cuatro dispositivos con probabilidad de colisión 0.8

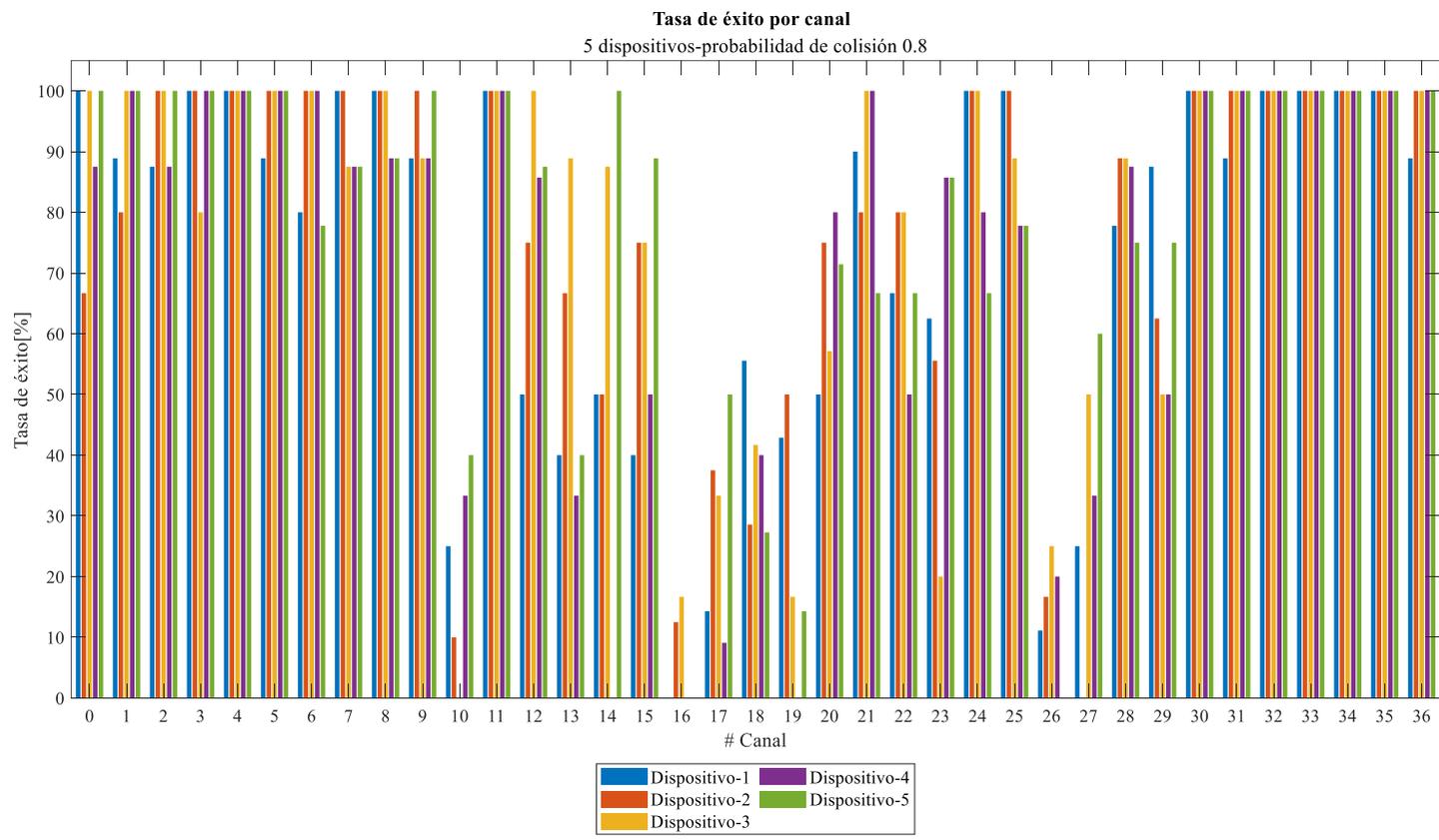


Figura 16. Escenario 5, cinco dispositivos con probabilidad de colisión 0.8

Rendimiento de la red

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Indicador	
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 1	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	150
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	37
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 2	8	8	8	8	8	9	8	8	8	8	9	8	8	8	8	9	8	8	8	8	9	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	300
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	37
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 3	12	12	12	12	12	13	12	12	12	12	13	12	12	12	12	13	12	12	12	12	13	12	12	12	12	13	12	12	12	12	13	12	12	12	12	12	12	450	
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	37	
Paquetes Rx totales esclavo-maestro	14	15	14	15	14	15	15	14	15	14	15	14	14	15	14	15	14	14	15	14	15	14	14	15	14	15	14	14	15	14	15	14	14	15	14	15	14	534	
Total de paquetes Rx fallidos esclavo-maestro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		

Figura 17. Resultados de simulación, escenario 1, dispositivo 1.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Indicador
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 1	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	5	4	4	4	4	4	2	4	1	2	3	3	3	3	3	4	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	135
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	5	0	0	0	3	2	3	0	3	1	1	1	2	1	1	3	1	2	1	1	0	0	0	0	0	1	0	38
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	31
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 2	8	8	8	8	8	9	8	8	8	8	5	12	8	9	4	5	4	4	5	5	9	8	4	8	6	4	6	5	7	7	8	11	8	8	8	8	8	265
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 2	0	0	2	1	1	0	1	1	1	0	5	0	1	3	3	2	3	2	4	5	7	5	3	5	3	3	4	3	2	1	0	1	0	1	0	1	1	75
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	37
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 3	12	12	12	12	12	13	12	12	12	12	5	16	12	13	5	5	5	4	3	6	5	4	5	4	5	5	3	5	11	11	13	16	12	12	12	12	12	342
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 3	0	0	3	2	1	0	1	2	1	0	4	0	2	4	1	0	4	4	2	6	2	2	2	2	1	1	2	4	3	1	1	1	0	1	0	1	1	62
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	30
Paquetes Rx totales esclavo-maestro	14	15	14	15	14	15	15	14	15	14	9	20	14	16	10	11	8	7	10	10	17	11	12	12	12	12	8	9	16	13	17	18	14	15	16	15	14	491
Total de paquetes Rx fallidos esclavo-maestro	0	0	3	2	1	0	1	2	1	0	8	0	2	4	3	2	6	5	7	10	9	6	4	6	3	3	6	6	4	1	1	1	0	1	0	1	1	110
Paquetes recibidos	14	15	11	13	13	15	14	12	14	14	1	20	12	12	7	9	2	2	3	0	8	5	8	6	9	9	2	3	12	12	16	17	14	14	16	14	13	381

Figura 18. Resultados de simulación, escenario 2, dispositivo 1.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Indicador		
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 1	4	3	4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	4	5	3	2	5	1	2	1	3	3	1	4	4	4	2	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	129	
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	3	0	2	4	1	1	4	1	2	1	2	1	1	2	0	2	1	0	0	0	1	1	1	0	0	2	1	0	2	37
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	31
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 2	8	7	9	8	8	9	8	8	8	8	4	12	4	6	7	11	5	7	2	3	8	3	2	5	8	5	3	1	7	11	8	11	8	8	8	8	9	255		
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 2	1	0	3	1	1	1	3	0	0	1	3	1	2	4	2	6	4	7	2	3	7	1	1	3	0	3	1	1	1	0	0	1	2	1	0	0	2	69		
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	37	
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 3	12	11	13	12	12	13	12	12	12	12	5	16	5	4	11	6	6	6	6	7	5	7	6	4	12	5	6	6	11	16	13	16	12	12	12	12	13	361		
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 3	1	1	3	1	1	1	3	1	0	2	3	1	1	0	2	0	6	5	5	6	1	2	2	1	0	1	2	6	2	1	0	1	2	1	1	0	3	69		
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	31	
Paquetes Rx totales esclavo-maestro	14	14	15	15	14	15	14	15	14	8	20	10	12	13	17	10	12	7	7	14	11	10	13	16	11	8	6	14	18	15	18	14	17	14	15	15	489			
Total de paquetes Rx fallidos esclavo-maestro	2	2	3	1	1	1	3	1	0	2	6	1	2	4	2	6	9	11	6	6	7	2	2	3	0	3	4	6	2	1	0	1	2	1	1	0	3	107		

Figura 19. Resultados de simulación, escenario 2, dispositivo 2.

Canales	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Indicador	
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 1	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	3	4	2	4	2	2	2	0	4	3	3	2	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	129
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	0	3	1	1	1	4	1	3	2	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	33
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 2	8	8	8	8	8	9	8	8	8	8	4	12	5	8	12	8	4	5	5	11	2	6	8	6	7	4	2	8	9	8	8	8	8	8	8	8	8	8	268
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	0	3	1	2	3	4	3	4	5	10	1	5	3	1	3	2	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	58
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	37
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 3	12	12	12	12	12	13	12	12	12	12	5	16	5	12	16	12	6	5	4	5	6	6	6	12	10	6	4	6	12	13	13	12	12	12	12	12	12	12	373
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 3	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	4	0	0	1	2	3	5	2	4	4	2	1	0	3	1	1	3	6	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	46
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	31
Paquetes Rx totales esclavo-maestro	14	15	14	15	14	15	15	14	15	14	8	20	11	15	18	14	9	12	9	9	19	8	15	17	12	14	7	6	15	15	15	14	16	17	14	15	14	503	
Total de paquetes Rx fallidos esclavo-maestro	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	6	0	3	1	2	3	8	8	8	8	10	1	5	3	1	3	4	6	0	2	0	0	0	0	0	0	0	84	

Figura 20. Resultados de simulación, escenario 3, dispositivo 1.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Indicador	
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 1	5	4	4	4	4	5	4	4	4	5	5	4	4	5	4	4	5	3	3	3	3	1	0	3	4	4	1	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	135
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	3	1	0	4	3	3	3	1	0	0	1	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	33
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 2	9	9	8	8	8	9	8	8	8	9	5	12	8	6	8	12	5	6	4	10	7	2	1	7	8	5	3	3	8	11	8	8	8	8	8	8	8	8	271
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	3	1	4	4	5	4	9	4	0	0	1	0	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	37
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 3	13	13	12	12	12	13	12	12	12	13	5	16	12	4	12	17	5	5	6	6	5	6	5	11	12	5	6	6	11	16	13	12	12	12	12	12	12	12	380
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 3	2	2	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	1	4	2	4	6	6	2	0	1	3	2	0	3	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	31
Paquetes Rx totales esclavo-maestro	15	16	14	15	14	15	14	14	15	15	9	20	14	12	14	19	11	10	10	15	13	10	9	16	14	11	6	6	14	18	15	14	16	17	14	15	14	503	
Total de paquetes Rx fallidos esclavo-maestro	2	2	0	0	0	0	0	0	0	2	5	0	0	3	1	4	6	9	10	14	6	0	1	3	2	2	3	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	81	

Figura 21. Resultados de simulación, escenario 3, dispositivo 2.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Indicador	
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 1	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	5	4	4	4	4	3	4	3	4	1	2	1	0	4	4	4	1	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	131
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	2	0	2	1	4	3	3	1	0	0	0	1	2	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	27
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	30
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 2	8	8	8	8	8	9	8	8	8	8	5	12	4	8	4	12	4	8	5	5	7	6	1	11	4	7	3	4	8	4	8	12	8	8	8	8	12	267	
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	2	2	2	2	4	8	4	5	4	3	0	3	2	1	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	56	
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	37	
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 3	12	12	12	12	12	13	13	12	12	12	6	16	5	12	5	16	5	5	4	5	5	5	5	17	5	12	6	4	12	5	13	16	12	12	12	12	16	370	
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 3	0	1	1	0	0	0	2	0	0	0	6	0	1	2	1	2	2	5	2	3	0	2	1	5	2	1	5	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	51	
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	31	
Paquetes Rx totales esclavo-maestro	14	15	14	15	14	15	15	14	15	14	10	20	10	15	10	18	10	12	9	9	13	14	9	22	10	14	6	7	15	10	15	18	16	17	14	15	18	501	
Total de paquetes Rx fallidos esclavo-maestro	0	1	1	0	0	0	2	0	0	0	10	0	2	2	2	2	6	12	6	7	4	4	1	5	3	1	5	5	2	2	0	0	0	0	0	0	0	85	

Figura 22. Resultados de simulación, escenario 3, dispositivo 3.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Indicador	
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 1	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	5	4	5	4	4	4	4	2	3	2	3	2	1	4	3	4	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	133	
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	5	0	3	0	2	0	3	2	2	2	1	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	33
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 2	8	8	8	8	8	10	8	8	8	8	5	12	5	8	4	13	4	6	11	4	11	5	4	8	7	8	3	3	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	275
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 2	0	0	0	1	2	2	1	1	0	0	5	0	3	0	2	1	3	3	7	2	8	2	3	2	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	55	
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	37
Paquetes Rx totales esclavo-maestro	10	11	11	11	11	12	11	10	11	11	7	15	7	11	7	15	8	8	14	8	13	8	6	11	10	11	7	5	11	11	11	11	10	11	11	11	11	378	
Total de paquetes Rx fallidos esclavo-maestro	0	0	0	1	2	2	1	1	0	0	7	0	3	0	2	1	7	5	9	6	8	3	3	2	3	2	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	73	

Figura 23. Resultados de simulación, escenario 4, dispositivo 1.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Indicador	
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 1	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	7	4	4	4	4	3	4	1	4	2	2	2	3	4	4	3	2	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	135	
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	4	0	1	1	1	3	1	4	2	0	1	1	1	1	4	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	32
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	33
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 2	8	8	8	8	8	9	8	8	8	8	7	12	8	8	8	8	4	4	4	10	5	6	6	6	4	6	3	5	12	8	8	8	8	8	8	8	8	271	
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 2	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	4	0	1	2	1	3	3	3	4	10	1	4	1	1	4	2	2	4	2	1	0	1	1	0	0	0	0	57	
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	37
Paquetes Rx totales esclavo-maestro	10	11	11	11	11	11	10	11	11	9	15	10	11	11	10	8	6	6	13	7	10	8	9	7	10	6	6	15	11	11	11	10	11	11	11	11	11	372	
Total de paquetes Rx fallidos esclavo-maestro	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	6	0	1	2	1	3	7	5	6	12	1	4	2	1	4	4	4	5	3	1	0	1	1	0	1	0	1	79	

Figura 24. Resultados de simulación, escenario 4, dispositivo 2.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Indicador	
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 1	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	1	2	4	2	0	3	3	4	1	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	130
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	3	0	0	3	2	1	4	4	1	2	1	1	0	0	2	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	31
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	32
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 2	8	8	8	8	8	9	8	8	8	8	4	12	8	6	4	9	4	4	6	8	8	8	8	7	7	8	1	3	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	267
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 2	0	0	1	0	2	0	0	0	0	1	3	0	0	3	2	2	4	4	4	8	3	5	3	2	5	3	1	3	1	1	0	0	0	0	1	0	0	62	
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	37
Paquetes Rx totales esclavo-maestro	10	11	11	12	11	11	11	10	11	11	6	15	10	8	7	11	7	6	9	11	10	11	10	10	10	10	11	3	5	10	11	11	11	10	11	11	11	11	366
Total de paquetes Rx fallidos esclavo-maestro	0	0	1	2	2	0	0	0	0	1	5	0	0	3	2	2	6	5	4	11	3	5	3	2	5	3	3	4	1	1	0	0	0	0	1	0	0	75	

Figura 25. Resultados de simulación, escenario 4, dispositivo 3.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Indicador	
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 1	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	3	0	3	3	1	3	4	4	2	0	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	129
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 1	0	1	0	0	0	1	0	2	0	0	4	0	1	2	2	0	2	4	3	0	1	1	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	32
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	30
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 2	8	8	9	8	8	9	8	4	12	8	4	8	12	5	4	7	4	4	5	4	11	6	9	11	4	9	4	5	7	7	8	12	8	8	8	8	8	8	272
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 2	0	1	2	0	0	2	1	2	1	0	4	0	2	3	2	0	2	4	5	4	5	2	5	6	2	4	1	5	1	4	0	0	0	0	0	0	1	71	
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	37
Paquetes Rx totales esclavo-maestro	10	11	12	11	11	11	11	6	15	11	6	11	14	7	7	9	7	6	8	8	13	9	11	14	7	12	7	7	10	10	11	15	9	11	11	11	11	371	
Total de paquetes Rx fallidos esclavo-maestro	1	1	2	0	0	2	1	2	1	0	4	0	2	3	2	0	5	5	7	6	5	2	5	6	2	4	3	7	1	4	0	1	0	0	0	0	1	85	

Figura 26. Resultados de simulación, escenario 4, dispositivo 4.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Indicador	
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 1	4	4	4	4	5	5	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	2	1	2	4	1	1	3	2	4	3	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	129	
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 1	0	0	1	0	0	1	2	0	0	2	0	2	3	2	2	4	2	0	2	2	0	1	1	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	31
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 2	8	8	8	8	9	9	8	8	8	8	8	4	5	4	5	4	7	7	7	4	9	9	7	5	8	8	4	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	267
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 2	0	1	1	0	0	1	2	0	0	1	6	0	2	3	2	3	4	6	4	4	2	1	3	3	0	0	7	3	2	1	0	1	0	0	0	0	1	64	
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	37
Paquetes Rx totales esclavo-maestro	8	9	8	9	9	10	8	9	9	8	9	4	5	4	5	5	7	9	7	4	10	9	8	5	9	9	4	9	8	9	9	8	9	8	9	8	9	9	287
Total de paquetes Rx fallidos esclavo-maestro	0	1	1	0	0	1	2	0	0	1	6	0	2	3	2	3	5	6	4	4	2	1	3	3	0	0	8	3	2	1	0	1	0	0	0	0	1	66	

Figura 27. Resultados de simulación, escenario 5, dispositivo 1.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Indicador	
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 1	4	4	4	4	4	5	4	4	4	5	4	4	4	4	4	3	4	4	3	0	3	0	1	4	2	2	2	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	127
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	2	2	4	1	4	4	2	0	2	0	0	2	0	0	1	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	37
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 2	9	8	8	8	8	9	8	8	8	6	8	5	5	5	8	5	5	6	4	7	4	5	5	5	5	6	3	8	5	8	8	8	8	8	8	8	8	248	
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 2	3	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	2	1	2	4	2	4	2	2	2	1	1	3	0	0	5	3	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	43
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	31
Paquetes Rx totales esclavo-maestro	9	10	8	9	9	9	8	9	9	10	9	8	9	8	8	8	8	7	4	8	5	5	9	5	6	6	3	9	8	9	9	9	8	9	9	9	294		
Total de paquetes Rx fallidos esclavo-maestro	3	2	0	0	0	0	0	0	9	0	2	3	4	2	7	5	5	2	2	1	1	4	0	0	5	3	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	64		

Figura 28. Resultados de simulación, escenario 5, dispositivo 2.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Indicador	
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 1	4	4	4	4	4	5	4	4	4	5	4	4	4	4	4	3	5	2	2	2	2	0	1	4	3	4	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	126
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	1	1	2	5	2	1	2	1	0	1	3	0	1	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	33
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 2	8	8	8	9	8	9	8	8	8	5	12	8	8	8	8	5	6	10	6	7	2	5	5	7	8	7	2	8	4	8	8	8	12	8	8	8	8	273	
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 2	0	0	0	2	0	0	0	1	0	1	5	0	0	1	1	2	5	4	5	5	3	0	1	4	0	1	5	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	50
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	37	
Paquetes Rx totales esclavo-maestro	8	9	8	10	9	9	9	8	9	9	5	13	8	9	8	8	6	6	12	6	7	3	5	5	7	9	8	2	9	4	9	9	8	13	8	9	9	293	
Total de paquetes Rx fallidos esclavo-maestro	0	0	0	2	0	0	0	1	0	1	5	0	0	1	1	2	5	4	7	5	3	0	1	4	0	1	6	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	53	

Figura 29. Resultados de simulación, escenario 5, dispositivo 3.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Indicador	
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 1	4	4	4	4	4	5	4	4	4	6	4	3	5	5	3	4	3	3	1	2	1	2	4	3	4	2	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	132	
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	4	0	1	3	5	3	4	3	2	1	0	0	2	1	1	1	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	36	
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	32
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 2	8	8	8	8	8	9	8	8	8	6	12	7	6	5	8	4	10	10	3	10	3	6	6	5	8	4	3	7	4	8	8	8	8	12	8	8	8	268	
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 2	1	0	1	0	0	0	0	1	1	4	0	1	4	5	4	4	9	6	3	2	0	3	1	1	2	3	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	62	
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	37	
Paquetes Rx totales esclavo-maestro	8	9	8	9	9	9	8	9	9	6	13	7	6	5	8	5	11	10	3	10	4	6	7	5	9	5	3	8	4	9	9	8	9	12	9	9	287		
Total de paquetes Rx fallidos esclavo-maestro	1	0	1	0	0	0	0	1	1	4	0	1	4	5	4	5	10	6	3	2	0	3	1	1	2	4	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	65	

Figura 30. Resultados de simulación, escenario 5, dispositivo 4.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Indicador	
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 1	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	2	3	3	3	1	1	2	2	4	0	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	129
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	1	2	0	0	4	1	2	3	2	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	24
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	35	
Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 2	8	8	8	8	8	9	8	8	8	8	10	8	8	5	11	9	4	6	10	7	7	5	5	6	6	8	3	5	7	8	8	8	8	8	8	8	8	275	
Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	6	0	1	3	0	1	4	3	7	6	2	2	2	1	2	2	3	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	54	
Estado del canal para esclavo después de Clasificación 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	31	
Paquetes Rx totales esclavo-maestro	8	9	8	9	9	9	9	8	9	9	10	9	8	5	12	9	4	6	11	7	7	6	6	7	6	9	4	5	8	8	9	9	8	9	8	9	9	295	
Total de paquetes Rx fallidos esclavo-maestro	0	0	0	0	0	0	2	1	1	0	6	0	1	3	0	1	4	3	8	6	2	2	2	1	2	2	4	2	2	2	0	0	0	0	0	0	57		

Figura 31. Resultados de simulación, escenario 5, dispositivo 5.

Código fuente

Main.m

```

clear
close all
clc
%% Escenario base
slavesCount = 1;
collisionProbabilities = [0, 0, 0, 0, 0, 0];
BLECoexistenceWithWLANSignalExample(slavesCount,collisionProbabilities)
%% Escenario base 1
slavesCount = 2;

```

```

collisionProbabilities = [0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8];
BLECoexistenceWithWLANSignalExample(slavesCount,collisionProbabilities)
%% Escenario base 3
slavesCount = 3;
collisionProbabilities = [0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8];
BLECoexistenceWithWLANSignalExample(slavesCount,collisionProbabilities)
%% Escenario base 4
slavesCount = 4;
collisionProbabilities = [0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8];
BLECoexistenceWithWLANSignalExample(slavesCount,collisionProbabilities)
%% Escenario base 5
slavesCount = 5;
collisionProbabilities = [0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8];
BLECoexistenceWithWLANSignalExample(slavesCount,collisionProbabilities)

```

Coexistence model

```

function []=BLECoexistenceWithWLANSignalExample(slavesCount,collisionProbabilities)
commSupportPackageCheck('BLUETOOTH');

```

```

%% BLE Configuration Parameters

% Create the BLE Master device capable of connecting with "slavesCount"
% number of Slaves
master = helperBLEDeviceModel('Role','Master', ...
    'SlavesCount',slavesCount);

% Initialize the channel classification parameters to classify the BLE
% channels into good or bad channels. PERThreshold: Packet
% error rate (PER) threshold value ClassificationInterval:
% Periodicity of channel classification RxStatusCount:
% Maximum number of received packets status MinRxCountToClassify:
% Minimum number of received packets status BadChannelClassificationMethod:
% Method for bad channels classification PreferredMinimumGoodChannels:
% Preferred number of good channels
channelClassification = helperBLEChannelClassification(...
    'PERThreshold',40, ...
    'ClassificationInterval',150, ...
    'RxStatusCount',50, ...
    'MinRxCountToClassify',4, ...

```

```

        'BadChannelClassificationMethod', 'Reset all the bad channels', ...
        'PreferredMinimumGoodChannels', 30);

% Assign channel classification parameters to the Master device
master.ChannelClassification = channelClassification;

% Initialize "slavesCount" number of Slaves
slaves(1, slavesCount) = helperBLEDeviceModel;

% Create "slavesCount" number of Slave devices
for idx = 1:slavesCount
    slaves(idx) = helperBLEDeviceModel('Role', 'Slave');
end

% Create "slavesCount" connections between the "Master" and "Slaves". This
% function creates a Link Layer connection by sharing the common connection
% parameters such as connection interval, access address for each
% Master-Slave connection pair.
[master, slaves] = helperBLECreateLLConnection(master, slaves);

```

```

%% Model WLAN Traffic
%
% This section models the WLAN traffic using specified configuration.
%
% *Configuration Parameters*
%
% The configuration parameters for each WLAN network includes collision
% probability, interference level, interference start time and interference
% end time in the specified WLAN channel. The
%
<matlab:openExample('bluetooth/BLECoexistenceWithWLANSignalExample','supportingFile','h
elperBLEWLANSignalTrafficConfig')
% helperBLEWLANSignalTrafficConfig> object is used to model the WLAN
% traffic.

% Set number of WLAN networks interfering with the BLE network
wlanNetworksCount = 6;

% Set of WLAN channels (in the range [1, 14]) used by each WLAN network
wlanChannels = [1, 5, 6, 12, 9, 8];

```

```

wlanInterferencePeriod = [0, inf; ...
    0, inf; ...
    0, 2100; ...
    0, inf; ...
    200, 2800; ...
    150, inf];

% Ratio of WLAN signal power level relative to BLE signal power level
wlanInterferenceLevel = [1.20, 0.90, 0.85, 0.95, 0.70, 1.15];

%%

% Create a configuration object for WLAN traffic
wlanTrafficConfig = helperBLEWLANSignalTrafficConfig();

% Configure WLAN traffic with the specified WLAN network parameters
wlanTraffic(wlanTrafficConfig, wlanNetworksCount, wlanChannels, collisionProbabilities,
...
    wlanInterferencePeriod, wlanInterferenceLevel);

```

```
%% Coexistence Simulation
%
% This section illustrates the communication between Master and Slave
% devices while interfering with WLAN signals.
%
% *Initialize Simulation Parameters*
%
% The simulation parameters required for the BLE coexistence with WLAN
% signal interference are initialized in this code.
%
% Initialize simulation parameters

% Reset the random number generator seed
sprev = rng('default');

% To enable the visualization of BLE coexistence with WLAN, set the
% "enableVisualization" to true. To disable the visualization of BLE
% coexistence with WLAN set the "enableVisualization" to false.
enableVisualization = true;
```

```

% To enable the visualization of channel hopping sequence, set the
% "enableHoppingVisualization" to true. To disable the visualization of
% channel hopping sequence, set the "enableHoppingVisualization" to false.
% If the "enableVisualization" is set to false, then
% "enableHoppingVisualization" is not considered.
enableHoppingVisualization = true;

% Total simulation time in milliseconds
simulationTime = 4000;
timeStep = 0.025;

% Parameters for generating BLE transmission mode
phyMode = 'LE1M'; % Mode can be 'LE2M' | 'LE1M' | 'LE500K' | 'LE125K'
EbNo = 16; % Eb/No value in dB

% Initialize PHY parameters sps: Samples per symbol bleSNR:
% BLE signal to noise ratio initImpairments: System object for BLE PHY
% impairments
[sps, bleSNR, initImpairments] = helperBLEInitPHYParameters(EbNo, phyMode);

```

```

% Create structure for an empty packet to initialize the output of Master
% and Slaves LLPDU:          Generated Link Layer Protocol Data Unit (PDU)
% appended with
%          Cyclic Redundancy Check (CRC)
% RateIndex:   String representing the rate at which the packet will be
%              transmitted. It contains one of 'LE2M' | 'LE1M' | 'LE500K'
%              | 'LE125K'
% AccessAddress: Unique address for each Master-Slave connection pair
% ChannelIndex: Channel on which the packet is transmitted
emptyPacket = struct('LLPDU', [], ...
    'AccessAddress', '', ...
    'RateIndex', '', ...
    'ChannelIndex', -1);

% Initialize the Slave output
slaveOutput = emptyPacket;

% Preallocate the buffers to store the Slave outputs
slaveOutputs = cell(1, slavesCount);

```

```

coexistenceModel = ...
    helperBLEVisualizeCoexistence(...
        'Action','Initialize', ...
        'SlaveCount',slavesCount, ...
        'WLANChannelList',wlanChannels, ...
        'PERThreshold',master.ChannelClassification.PERThreshold, ...
        'ClassificationInterval',master.ChannelClassification.ClassificationInterval, ...
        'ChannelBusyCountThreshold',master.ChannelClassification.ChannelBusyCountThreshold,
        ...

        'PreferredMinimumGoodChannels',master.ChannelClassification.PreferredMinimumGoodChannels, ...
    ...
        'ConnectionInterval',master.LLConnectionConfigs(1).ConnectionInterval, ...
        'Stoptime',simulationTime, ...
        'PHYMode',phyMode, ...
        'EnableVisualization',enableVisualization, ...
        'EnableHoppingVisualization',enableHoppingVisualization);
coexistenceModel.initializeVisualization();
viewModel(coexistenceModel);
master.CoexistenceVisualization = coexistenceModel;

```

```

% Run simulation
for simulationTimer = 0:timeStep:simulationTime
    % Stop the simulation, if all the Slaves are disconnected from the
    % Master due to interference. If the PER of the BLE channels in which
    % they are communicating with each other is high, then the Master and
    % the Slave are disconnected. The PER of the channel is high because of
    % the high collision probability in the respective channel.
    if numel(master.ActiveConnectionIdxs(master.ActiveConnectionIdxs ~= -1)) == 0
        fprintf('Simulation terminated as all Slaves are disconnected from the Master
device.\n')
        break;
    end

    % Update WLAN traffic in visualization
    helperBLEUpdateWLANTraffic(slavesCount, wlanChannels, wlanTrafficConfig,
simulationTimer, master);

    % MASTER: Transmitting or Receiving mode
    if (master.ActiveChannel == slaveOutput.ChannelIndex) && ...

```

```

        ~isempty(slaveOutput.LLPDU)
    masterOutput = run(master, slaveOutput);
else
    masterOutput = run(master, emptyPacket);
end

if ~(isempty(masterOutput.LLPDU))
    % Generate PHY waveform
    masterOutput.RateIndex = phyMode;
    masterWaveformTx = helperBLEPHYTx(masterOutput, sps);

    % Add impairments
    masterWaveformTx = helperBLEImpairments(initImpairments, masterWaveformTx,
sps);

    % Add WLAN interference
    masterWaveformTx = addInterference(wlanTrafficConfig, ...
        masterOutput.ChannelIndex, simulationTimer, masterWaveformTx);

    % Pass the transmitted waveform through AWGN channel

```

```

masterWaveformRx = awgn(masterWaveformTx, bleSNR);

% Decode PHY waveform after adding impairments and interference
[decodedMasterPacket, decodedMasterAccessAddress] =
helperBLEPHYRx(masterWaveformRx, ...
    phyMode, sps, masterOutput.AccessAddress, masterOutput.ChannelIndex);

masterOutput.LLPDU = decodedMasterPacket;
% Access address becomes empty when the BLE PHY receiver fails to
% detect a valid BLE packet due to high interference level or
% impairments or noise level.
if ~isempty(decodedMasterAccessAddress)
    masterOutput.AccessAddress = dec2hex(bin2de(decodedMasterAccessAddress'),
8);

end

end

% Update current simulation time
master.CoexistenceVisualization.CurrentTime = simulationTimer;
master.CoexistenceVisualization.Action = 'Simulation Progress';

```

```

% SLAVE: Transmitting or Receiving mode
for idx = 1:slavesCount
    % Pass the "MasterOutput" to the Slave listening in the same
    % frequency
    if (slaves(idx).ActiveChannel == masterOutput.ChannelIndex) && ...
        ~isempty(masterOutput.LLPDU)
        slaveOutputs{idx} = run(slaves(idx), masterOutput);
        % Pass an empty packet to all other Slaves
    else
        slaveOutputs{idx} = run(slaves(idx), emptyPacket);
    end

    % Update simulation progress for each Slave
    master.CoexistenceVisualization.SlaveNumber = idx;
    viewModel(master.CoexistenceVisualization)
end

slaveOutput = emptyPacket;

```

```

% Get the active Slave output (At any time instance only one Slave is
% active)
for idx = 1:slavesCount
    if ~isempty(slaveOutputs{idx}.LLPDU)
        slaveOutput = slaveOutputs{idx};
        break
    end
end

if ~isempty(slaveOutput.LLPDU)
    % Generate PHY waveform
    slaveOutput.RateIndex = phyMode;
    slaveWaveformTx = helperBLEPHYTx(slaveOutput, sps);

    % Add BLE impairments
    slaveWaveformTx = helperBLEImpairments(initImpairments, slaveWaveformTx, sps);

    % Add WLAN interference
    slaveWaveformTx = addInterference(wlanTrafficConfig, ...
        slaveOutput.ChannelIndex, simulationTimer, slaveWaveformTx);

```

```

% Pass the transmitted waveform through AWGN channel
slaveWaveformRx = awgn(slaveWaveformTx, bleSNR);

% Decode PHY waveform after adding impairments and interference
[decodedSlavePacket, decodedSlaveAccessAddress] =
helperBLEPHYRx(slaveWaveformRx, ...
    phyMode, sps, slaveOutput.AccessAddress, slaveOutput.ChannelIndex);

slaveOutput.LLPDU = decodedSlavePacket;
% Access address becomes empty when the BLE PHY receiver fails to
% detect a valid BLE packet due to high interference level or
% impairments or noise level.
if ~isempty(decodedSlaveAccessAddress)
    slaveOutput.AccessAddress = dec2hex(bi2de(decodedSlaveAccessAddress'), 8);
end
end
end

% Update the simulation progress for each Slave

```

```

for idx = 1:slavesCount
    master.CoexistenceVisualization.SlaveNumber = idx;
    master.CoexistenceVisualization.Action = 'Simulation Progress';
    viewModel(master.CoexistenceVisualization)
end

% Log the statistics of this example to
% |bleCoexistenceWithWLANSignalStatistics.mat| file
helperBLELogCoexistenceStats(master, slaves, ...
    'bleCoexistenceWithWLANSignalStatistics.mat');

% Restore the previous setting of random number generation
rng(sprev)

end

Métricas.m
%% Métricas
hold off
dispositivos = 5

```

```

prob = 0.8
probabilidad = [num2str(dispositivos) ' dispositivos-probabilidad de colisión '
num2str(prob)];
load('bleCoexistenceWithWLANSignalStatistics.mat')
for i=1:length(bleWLANCoexistenceStatistics)
result=table2array(bleWLANCoexistenceStatistics{i}(10,:))-
table2array(bleWLANCoexistenceStatistics{i}(11,:));
rate(i,1:length(table2array(bleWLANCoexistenceStatistics{i}(10,:)))) = (result ./
table2array(bleWLANCoexistenceStatistics{i}(10,:)))*100;
etiqueta{i} =strcat('Dispositivo-',num2str(i));
escenario =[num2str(dispositivos), 'disp_prob', num2str(prob), '_slave', num2str(i)]
%% Guardar resultados
%% Etiquetas para filas
filas = [
    "Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 1";
    "Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 1";
    "Estado del canal para esclavo después de Clasificación 1";
    "Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 2";
    "Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 2";
    "Estado del canal para esclavo después de Clasificación 2";

```

```

    "Paquetes Rx esclavo-maestro Clasificación 3";
    "Paquetes Rx fallidos esclavo-maestro Clasificación 3";
    "Estado del canal para esclavo después de Clasificación 3";
    "Paquetes Rx totales esclavo-maestro";
    "Total de paquetes Rx fallidos esclavo-maestro "];
filas = table(filas);
columnas = table(0:36);
writetable(bleWLANCoexistenceStatistics{i}, 'Resultados.xlsx', 'Sheet', escenario, 'Range',
'A1', 'WriteRowNames', true);
writetable(filas, 'Resultados.xlsx', 'Sheet', escenario, 'Range', 'A1');
writetable(columnas, 'Resultados.xlsx', 'Sheet', escenario, 'Range', 'B1', 'WriteVariableName
s', false);
end
figure(10)
bar(0:36, rate')
xticks(0:36)
ylim([0 105])
xlabel('# Canal')
ylabel('Tasa de éxito[%]')
title('Tasa de éxito por canal ', probabilidad)

```

```
legend(etiqueta, 'Location', 'southoutside', 'NumColumns', 2, 'FontName', 'Times New  
Roman', 'FontSize', 12)  
set(gca, 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 12)  
set(gcf, 'Position', get(0, 'Screensize'));  
saveas(gcf, [num2str(dispositivos), 'disp_prob', num2str(prob), '.emf'])  
close(figure(10))
```