



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES**

**Diseño de una red basada en tecnología de radio de ultra baja potencia para comunicaciones fiables en IoT**

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero en Telecomunicaciones

**Autor:**

Joel Alejandro Guerra Barba

**Tutor:**

Ing. Luis Tello Oquendo, PhD.

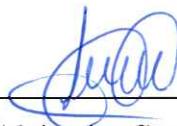
Riobamba, Ecuador. 2022

## DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, Joel Alejandro Guerra Barba, con cédula de ciudadanía 060418301-2, autor del trabajo de investigación titulado: DISEÑO DE UNA RED BASADO EN TECNOLOGÍA DE RADIO DE ULTRA BAJA POTENCIA PARA COMUNICACIONES FIABLES EN IoT, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 02 de diciembre de 2022.



---

Joel Alejandro Guerra Barba

C.I: 060418301-2



## ACTA FAVORABLE - INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En la Ciudad de Riobamba, a los 17 días del mes de noviembre de 2022, luego de haber revisado el Informe Final del Trabajo de Investigación presentado por el estudiante Joel Alejandro Guerra Barba con CC: 060418301-2 de la carrera Ingeniería en Telecomunicaciones y dando cumplimiento a los criterios metodológicos exigidos, se emite el **ACTA FAVORABLE DEL INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN** titulado "Diseño de una red basada en tecnología de radio de ultra baja potencia para comunicaciones fiables en IoT", por lo tanto, se autoriza la presentación del mismo para los trámites pertinentes.

---

Ing. Luis P. Tello Oquendo, PhD.  
**TUTOR(A)**

## CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación DISEÑO DE UNA RED BASADO EN TECNOLOGÍA DE RADIO DE ULTRA BAJA POTENCIA PARA COMUNICACIONES FIABLES EN IoT, presentado por Joel Alejandro Guerra Barba, con cédula de identidad número 060418301-2, bajo la tutoría de Dr. Luis Patricio Tello Oquendo; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 02 de diciembre de 2022.

Franklin Samaniego, PhD.  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO**

Marlon Basantes, PhD.  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**

Alejandra Pozo, Mgs.  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**



FIRMA



FIRMA



FIRMA



Dirección  
Académica  
VICERRECTORADO ACADÉMICO

*en movimiento*



UNACH-RGF-01-04-08.15  
VERSIÓN 01: 06-09-2021

# CERTIFICACIÓN

Que, **Joel Alejandro Guerra Barba** con CC: **060418301-2**, estudiante de la Carrera **Telecomunicaciones**, Facultad de **Ingeniería**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado " **DISEÑO DE UNA RED BASADA EN TECNOLOGÍA DE RADIO DE ULTRA BAJA POTENCIA PARA COMUNICACIONES FIABLES EN IoT**", cumple con el **0 %**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **URKUND**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente, autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 28 de noviembre de 2022.

---

PhD. Luis Tello Oquendo  
**TUTOR**

## **DEDICATORIA**

*El presente trabajo lo dedico a mis padres,  
por ser mi inspiración, mi apoyo y fortaleza,  
a mi hermana por ser mi amiga incondicional,  
a mi novia Danny por todo su amor verdadero,  
y a todos los seres que dan alegría a mi vida.*

## **AGRADECIMIENTO**

*Doy gracias a Dios por culminar mi carrera profesional, a mi querida Universidad, a mis profesores y compañeros, a mi tutor por guiarme con rigor, sencillez y generosidad, a toda mi familia por ser mi ejemplo y la mayor bendición.*

# ÍNDICE

RESUMEN . . . . .	6
ABSTRACT . . . . .	7
<b>I PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>8</b>
1.1 Introducción . . . . .	8
1.2 Planteamiento del Problema . . . . .	9
1.3 Objetivos de la investigación . . . . .	10
1.3.1 General . . . . .	10
1.3.2 Específicos . . . . .	10
1.4 Justificación . . . . .	11
1.5 Importancia . . . . .	11
<b>II MARCO TEÓRICO</b>	<b>12</b>
2.1 Internet de las cosas . . . . .	12
2.2 Redes de Sensores . . . . .	13
2.3 Control de acceso al medio (MAC) . . . . .	14
2.4 Comunicaciones seguras y fiables . . . . .	15
2.5 MURIST: Principio y Operaciones . . . . .	16
2.5.1 El principio de MURIST . . . . .	16
2.5.2 La Operación de MURIST . . . . .	18
<b>III METODOLOGÍA</b>	<b>20</b>
3.1 Tipo de Investigación . . . . .	20
3.1.1 Investigación Exploratoria . . . . .	20
3.2 Métodos, Técnicas e Instrumentos de Investigación . . . . .	21
3.2.1 Método Analítico . . . . .	21
3.2.2 Modelo de Simulación . . . . .	21
3.3 Técnica de Recolección de Datos . . . . .	21
3.3.1 Observación . . . . .	21
3.4 Modelo del Sistema . . . . .	21
3.4.1 Métricas de rendimiento . . . . .	23
3.5 Validación de la Solución Propuesta . . . . .	26
<b>IV OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES</b>	<b>28</b>
4.1 Variables de la investigación . . . . .	28

<b>V RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>29</b>
5.1 Contratación de hipótesis con los resultados . . . . .	52
5.1.1 Muestra . . . . .	52
5.1.2 Análisis de normalidad y comparación de medias para muestras independientes $M = 4$ . . . . .	53
<b>VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>62</b>
6.1 Conclusiones . . . . .	62
6.2 Recomendaciones . . . . .	64
<b>REFERENCIAS</b>	<b>68</b>
<b>Anexos</b>	<b>69</b>

# Índice de tablas

1	Operacionalización de las variables . . . . .	28
2	$N = 4$ , $CW \geq 2$ y $CW \leq 32$ , $P_s \geq 95\%$ , menor número de (M), resaltados con color rojo . . . . .	30
3	$N = 6$ , $CW \geq 2$ y $CW \leq 32$ , $P_s \geq 95\%$ , menor número de (M), resaltados con color rojo . . . . .	31
4	$N = 8$ , $CW \geq 2$ y $CW \leq 32$ , $P_s \geq 95\%$ , menor número de (M), resaltados con color rojo . . . . .	32
5	$N = 10$ , $CW \geq 2$ y $CW \leq 32$ , $P_s \geq 95\%$ , menor número de (M), resaltados con color rojo . . . . .	33
6	$N = 12$ , $CW \geq 2$ y $CW \leq 32$ , $P_s \geq 95\%$ , menor número de (M), resaltados con color rojo . . . . .	34
7	$N = 14$ , $CW \geq 2$ y $CW \leq 32$ , $P_s \geq 95\%$ , menor número de (M), resaltados con color rojo . . . . .	35
8	$N = 16$ , $CW \geq 2$ y $CW \leq 32$ , $P_s \geq 95\%$ , menor número de (M), resaltados con color rojo . . . . .	36
9	$N = 18$ , $CW \geq 2$ y $CW \leq 32$ , $P_s \geq 95\%$ , menor número de (M), resaltados con color rojo . . . . .	37
10	$N = 20$ , $CW \geq 2$ y $CW \leq 32$ , $P_s \geq 95\%$ , menor número de (M), resaltados con color rojo . . . . .	38
11	Retardo cuando $N = 4$ . . . . .	39
12	Retardo cuando $N = 6$ . . . . .	39
13	Retardo cuando $N = 8$ . . . . .	40
14	Retardo cuando $N = 10$ . . . . .	40
15	Retardo cuando $N = 12$ . . . . .	41
16	Retardo cuando $N = 14$ . . . . .	41
17	Retardo cuando $N = 16$ . . . . .	42
18	Retardo cuando $N = 18$ . . . . .	42
19	Retardo cuando $N = 20$ . . . . .	43
20	Energía cuando $N = 4$ . . . . .	44
21	Energía cuando $N = 6$ . . . . .	44
22	Energía cuando $N = 8$ . . . . .	44
23	Energía cuando $N = 10$ . . . . .	45
24	Energía cuando $N = 12$ . . . . .	45
25	Energía cuando $N = 14$ . . . . .	46

26	Energía cuando $N = 16$ . . . . .	46
27	Energía cuando $N = 18$ . . . . .	47
28	Energía cuando $N = 20$ . . . . .	47
29	Comparación Retardo cuando $M=4$ , en una ventana de 16 . . . . .	53
30	Comparación Energía cuando $M = 4$ , $CW = 16$ . . . . .	55
31	Comparación Retardo cuando $M=4$ , en una ventana de 32 . . . . .	57
32	Comparación de consumo de energía cuando $M = 4$ , en una ventana $CW = 32$ . . . . .	59

# Índice de figuras

1	Clasificación de las redes de sensores inalámbricos . . . . .	15
2	Protocolo MURIST para cada dispositivo . . . . .	17
3	Transmisión basada en MURIST con 3 dispositivos compitiendo por el acceso al medio . . . . .	19
4	Comparación Energía cuando $M = 4$ , $N = 2n + 2$ para $n \geq 3$ y $n \leq 9$ , $CW = \{16, 32\}$ . . . . .	49
5	Comparación Retardo cuando $M=4$ , $N = 2n + 2$ para $n \geq 3$ y $n \leq 9$ , $CW = \{16, 32\}$ . . . . .	49
6	Comparación Energía cuando $M=10$ , $N = 2n + 2$ para $n \geq 3$ y $n \leq 9$ , $CW = \{16, 32\}$ . . . . .	50
7	Comparación Retardo cuando $M=10$ , $N = 2n + 2$ para $n \geq 3$ y $n \leq 9$ , $CW = \{16, 32\}$ . . . . .	50
8	Comparación Energía cuando $M=16$ , $N = 2n + 2$ para $n \geq 3$ y $n \leq 9$ , $CW = \{16, 32\}$ . . . . .	51
9	Comparación Retardo cuando $M=16$ , $N = 2n + 2$ para $n \geq 3$ y $n \leq 9$ , $CW = \{16, 32\}$ . . . . .	51
10	Distribución de Probabilidad del Retardo cuando $M=4$ y $CW=16$ . . . . .	55
11	Distribución de Probabilidad de la Energía cuando $M=4$ y $CW=16$ . . . . .	57
12	Distribución de Probabilidad del retardo cuando $M=4$ y $CW=32$ . . . . .	59
13	Distribución de Probabilidad de la energía cuando $M=4$ y $CW=32$ . . . . .	61

## RESUMEN

Las tecnologías emergentes se orientan a facilitar las comunicaciones humano-máquina, de manera específica en el ámbito de la Internet de las Cosas (IoT), cuyas aplicaciones se orientan a lograr una comunicación energéticamente eficiente. Los mecanismos de control de acceso al medio (MAC) pueden aportar notablemente al consumo de energía en un ciclo de trabajo. En los últimos años se han implementado redes de sensores para aplicaciones IoT por medio de receptores wake-up radio, obteniendo ultra bajo consumo de energía. En este trabajo se presenta un protocolo MAC para transmisión de datos síncronos en una red IoT basada en wake-up radio, consideramos la probabilidad de acceso satisfactorio como métrica de análisis y la evaluamos en función de la topología de la red. La evaluación del protocolo MAC se realiza en escenarios con diferentes cargas de tráfico; las variables intervinientes son analizadas con la finalidad de garantizar comunicaciones IoT fiables.

Para ello, se implementó un modelo de simulación por eventos discretos de una red wake-up radio en Matlab, operando con nodos en los estados de sueño profundo, sueño ligero y activo, que desencadenan mensajes de multidifusión. El rendimiento de la red propuesta se basa en la medición de la probabilidad de acceso satisfactorio en cada intento de transmisión; adicionalmente se evalúan variables como el retardo y energía. Para garantizar comunicaciones fiables se configuran parámetros de la red tales como retransmisiones permitidas y el tamaño de la ventana de contención para mantener una probabilidad de acceso satisfactorio mayor o igual al 95%.

Palabras clave: Algoritmo MURIST, Comunicaciones fiables, Internet de las cosas, Protocolo MAC, Ultra bajo consumo de energía.

## ABSTRACT

Emerging technologies aim to facilitate human-machine communications, specifically on the Internet of Things (IoT); applications are geared towards achieving energy-efficient communication. Media access control (MAC) mechanisms can significantly contribute to energy consumption in a duty cycle. Recently, sensor networks have been implemented for IoT applications using wake-up radio receivers, obtaining ultra-low power consumption. This paper presents a MAC protocol for synchronous data transmission in an IoT network based on wake-up radio; it considers the probability of successful access as an analysis metric and evaluates it as a function of the network topology. The MAC protocol is evaluated in scenarios with different traffic loads; the intervening variables are analyzed to ensure reliable IoT communications. For this purpose, a discrete event simulation model of a wake-up radio network was implemented in Matlab, operating with nodes in deep sleep, light sleep, and active states, which trigger multicast messages. The performance of the proposed network is based on the measurement of the probability of successful access at each transmission attempt; additionally, variables such as delay and energy are evaluated. To ensure reliable communications, network parameters such as allowed retransmissions and contention window size are configured to maintain a probability of successful access greater than or equal to 95%.

**Keywords:** Successful access, Reliable communications, Internet of Things, MAC protocol, Ultra-low power consumption.



HUGO HERNAN  
ROMERO ROJAS

Reviewed by:  
Mgs. Hugo Romero  
**ENGLISH PROFESSOR**  
**C.C. 0603156258**

# Capítulo I

## PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.1 Introducción

Las tecnologías emergentes se orientan a facilitar las comunicaciones humano-máquina, de manera específica en el ámbito de la Internet de las cosas (IoT), con aplicaciones de automatización industrial, ciudades inteligentes, vigilancia de infraestructura crítica, comunicaciones basadas en vehículos aéreos no tripulados y aplicaciones de redes inteligentes. Una característica común de estas aplicaciones es recopilar datos de IoT o dispositivos sensores, que generalmente funcionan con baterías y se implementan para medir y reportar diferentes parámetros de ambientes monitoreados [9]. En muchas aplicaciones de IoT, es recomendable contar con una comunicación energéticamente eficiente, con ello es posible reducir notablemente el consumo de energía. Los mecanismos de control de acceso al medio (MAC), pueden aportar notablemente el consumo de energía en un ciclo de trabajo. Por ejemplo, al operar o pasar a estado inactivo de forma cíclica [2] .

Los nodos de destino deben estar escuchando el medio para recibir datos cuando

el nodo remitente inicia la comunicación. Para lograr esta sincronización, existen diferentes esquemas de encuentro, entre los cuales desde el punto de vista energético, el más eficiente es la utilización de receptores wake-up [21].

En los últimos años se han implementado redes de sensores por medio de (WuR); entre ellos, aquellos basados en receptores de ultra bajo consumo, en receptores pasivos, centrados en los protocolos de administración de energía, y hasta aplicaciones de circuitos basados en infrarrojos o señales acústicas [17].

La comunicación entre dispositivos IoT deben garantizar la entrega exitosa de los datos; para tal efecto [19]. Un dispositivo de IoT utilizado para WuR, cuenta con un receptor despertador conectado a una radio principal equipada con una unidad de microcontrolador; el consumo de energía del receptor de un sistema WuR es del orden de los micro vatios o nano vatios, mientras que el consumo de la radio principal está en el orden de los mili vatios [14].

En el presente trabajo se realizará el estudio para el diseño de un sistema de comunicación basado en tecnología de radio de ultra baja potencia (wake-up radio) en una red IoT, aportando de manera significativa a la fiabilidad de las comunicaciones.

## **1.2 Planteamiento del Problema**

Conseguir una red más fluida entre personas, procesos y cosas se vuelve posible a través de dispositivos integrados que ofrece el internet con la tecnología IoT. Actualmente, los dispositivos electrónicos que puedan conectarse al Internet cuentan con prestaciones para ser utilizado en IoT gracias al avance tecnológico en hardware y software; con esto podemos referirnos a ordenadores de uso general, móviles y radio como es el objeto de estudio. Las Wake-up Radio (WuR) por su baja latencia, alto ahorro de energía y comunicación bajo demanda se están volviendo muy populares en las redes IoT.

Adicionalmente, una deficiencia de la transmisión de datos basada en acceso distribuido es la vulnerabilidad a colisiones potenciales ya que un dispositivo en una red distribuida no es consciente de la(s) transmisión(es) de otros dispositivos en la misma red. Las colisiones podrían producirse cuando más de un dispositivo inicia sus transmisiones a través de mensajes Wake-up Call (WuC) simultáneamente, o cuando las transmisiones de paquetes de datos por más de un dispositivo se superponen entre sí.

Finalmente, la situación más adversa sumado efecto y como de las dificultades relatadas anteriormente es la falta de garantía de entrega de los paquetes, es decir la fiabilidad de las comunicaciones IoT

Una de las principales limitaciones en redes WuR-IoT es el alto consumo de energía debido a la cantidad de saltos de los paquetes de datos previo establecimiento de la ruta; proceso realizado entre el origen y el destino antes de la transmisión de datos.

## **1.3 Objetivos de la investigación**

### **1.3.1 General**

- Diseñar una red basada en tecnología wake-up radio para comunicaciones IoT fiables.

### **1.3.2 Específicos**

- Revisar el estado del arte en relación con la tecnología wake-up radio.
- Proponer un protocolo MAC para transmisión de datos síncronos en una red IoT basada en wake-up radio.
- Determinar la probabilidad de acceso satisfactorio en función de la topología de red como métrica de análisis.

- Evaluar el protocolo de red en escenarios con diversas cargas de tráfico y obtener los rangos de operación de las variables del sistema para garantizar una comunicación fiable.

## **1.4 Justificación**

WuR reduce drásticamente la energía requerida por los nodos inalámbricos. El sistema WuR puede ahorrar energía en diferentes aplicaciones, como recuperar información de sensores de contaminación ambiental colocados en ciudades por nodos colectores móviles o activar AP inalámbricos inactivos. Son fáciles de programar y proporcionan una sincronización implícita.

En la presente investigación se abordaran los dos grandes desafíos de este tipo de redes, como son el lograr comunicaciones eficientes y comunicaciones fiables. Para ello será necesario diseñará un protocolo MAC basado en WuR, conociendo de que el modelo de sistema consiste en un clúster de red con  $N$  dispositivos y un recolector de datos. Los dispositivos realizan un elevado número de transmisiones de paquetes sincrónicamente a través de un WuC de multidifusión común. Por otro lado, se deberá desarrollar un modelo analítico del protocolo propuesto que permita el cálculo de diferentes métricas de rendimiento de la red como la probabilidad de acceso satisfactorio. Con ello se pretende identificar la configuración óptima del sistema, de modo que se maximice esta probabilidad y se pueda garantizar comunicaciones fiables.

## **1.5 Importancia**

Entre las ventajas de los sistemas WuR están: la facilidad de programarlos y la provisión de sincronización implícita.

# Capítulo II

## MARCO TEÓRICO

### 2.1 Internet de las cosas

El Internet de las Cosas es el componente tecnológico fundamental sobre el que sienta sus bases el paradigma de la Industria 4.0. y aunque pudiese parecer de otra forma, dada su omnipresencia en cualquier artículo o discusión tecnológica, el término "Internet de las Cosas" es bastante reciente. Fue en 2009 cuando Kevin Ashton, profesor del MIT en aquel entonces, usó la expresión Internet of Things (IoT) de forma pública por primera vez, y desde entonces el crecimiento y la expectación alrededor del término ha ido en aumento de forma exponencial. Fue en el RFID journal [6] cuando Ashton acuñó públicamente el término. Aunque él mismo ha comentado que la expresión era de uso corriente en círculos internos de investigación desde 1999, si bien no se hizo público de forma notoria hasta entonces.

El origen de los objetos conectados se remonta hasta los albores tecnológicos del siglo XIX, en lo que se consideran los primeros experimentos de telemetría de la historia. El primero del que se tiene constancia fue el llevado a cabo en 1874 por científicos franceses.

La popularización de conectividad inalámbrica ya fuese celular o WiFi, durante el inicio del siglo XXI, permitió por fin presenciar una primera explosión en el crecimiento de los objetos conectados. Este crecimiento se ha constatado especialmente en la última década, donde se han venido sucediendo nuevos conceptos como el WSN (Wireless Sensor Networks) o M2M (Machine to Machine), para finalmente dar paso al IoT. A diferencia de los previos, sobre todo del M2M, el IoT tiene un carácter más universal en su concepción, protocolos, redes, apertura de interfaces, entornos de desarrollo y explotación, así como en las expectativas suscitadas en el mercado desde su popularización [13].

## **2.2 Redes de Sensores**

Las redes de sensores inalámbricos (WSN, del inglés Wireless Sensor Networks), han captado atención en los últimos años, particularmente con la proliferación en Sistemas Micro-Electro-Mecánicos (MEMS, del inglés Micro-Electro-Mechanical Systems), tecnología que ha facilitado el desarrollo de sensores inteligentes. Los sensores de este tipo de redes, en comparación con los sensores tradicionales son pequeños, con procesamiento y recursos informáticos limitados, y de bajo costo; sin embargo, su potencial es alto, por su capacidad para detectar, medir y recopilar información del entorno; adicionalmente en base a algún proceso de decisión local, pueden transmitir los datos al usuario [10].

La WSN consta de varios nodos sensores que interactúan entre sí, y se distribuyen de forma espacial sobre cualquier fenómeno físico o ambiental. El nodo de sensor inalámbrico clásico consta de cuatro partes principales: módulo de sensor, un módulo de memoria y procesamiento, un módulo transceptor y una unidad de potencia. Los nodos sensores en una red pueden procesar, recopilar información e interactuar con otros nodos [12]. Dado que los nodos sensores tienen limitaciones de memoria y normalmente se implementan en lugares de difícil acceso, se localiza una radio de comunicación inalámbrica para transferir los datos a una estación base; la batería es la fuente de energía en un sensor

nodo.

Los principales objetivos de una WSN son la privacidad o confidencialidad, la integridad, la autenticación y la disponibilidad. Las WSN utilizan múltiples servicios para compartir el espectro de frecuencias, así como protocolos similares y diferentes [16]. Las WSN se organizan y reparan por sí mismas y operan una topología dinámica en el entorno de saltos múltiples, lo que falla en la tolerancia y la vulnerabilidad a los ataques maliciosos. La gama de tareas en una WSN se puede clasificar en términos generales en tres grupos como se muestra en la Figura 1. El primer grupo es el sistema, cada nodo sensor es un sistema individual. Para apoyar diferente software de aplicación en un sistema de sensores, desarrollo de nuevas plataformas, sistemas operativos y almacenamiento se necesitan esquemas. El segundo grupo es la comunicación, los protocolos, que permiten la comunicación entre la aplicación y los sensores. El último grupo son los servicios que se desarrollan para mejorar la aplicación y mejorar el rendimiento del sistema y la eficiencia de la red.

## **2.3 Control de acceso al medio (MAC)**

El control de acceso a los medios en informática y telecomunicaciones es un conjunto de mecanismos y protocolos mediante los cuales múltiples dispositivos acuerdan compartir un medio de transmisión común [4], generalmente cable eléctrico o de fibra óptica, o el rango de frecuencia asignado a su sistema en comunicaciones inalámbricas. Sin un método de organización, pueden ocurrir distracciones molestas o directamente entorpecer la comunicación. Más específicamente, en redes informáticas, el acrónimo MAC se utiliza en la serie de estándares IEEE 802 para definir la subcapa de control de acceso a medios [15]. La subcapa MAC se encuentra en la parte inferior de la capa de enlace de datos (capa 2 del modelo de referencia OSI). La implementación específica de esta subcapa puede variar según los requisitos de la capa física (por ejemplo, Ethernet, WLAN)

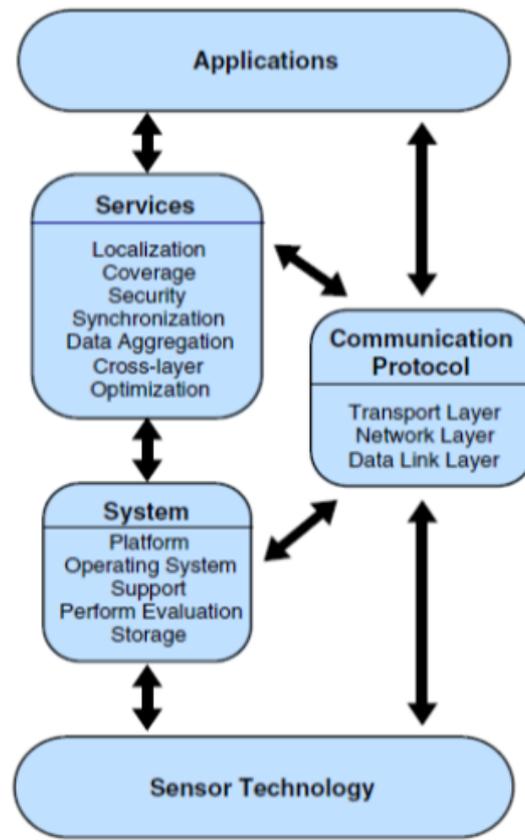


Figura 1: Clasificación de las redes de sensores inalámbricos  
(Fuente: Autor)

[3]. Entre las funciones de la subcapa MAC en este estudio, nos centraremos en las funciones encargadas de controlar el acceso al medio físico de transmisión por parte de los dispositivos que comparten el mismo canal, ya que pretendemos evaluar el desempeño del protocolo MAC para la comunicación M2M [18].

## 2.4 Comunicaciones seguras y fiables

Las tareas de recopilación de datos realizadas por UAV (vehículos aéreos no tripulados) requieren una alta probabilidad de transmisión exitosa y una baja latencia [7]. Vale la pena señalar que tales escenarios y protocolos propuestos son más adecuados para la recopilación de datos de misión crítica, mientras que los protocolos de transporte como LoRaWAN [1] basado en DC son más adecuados para la generación de informes de datos

en circunstancias normales. Cada dispositivo IoT en la red está equipado con un WuRx asociado con su MR. La tarea principal de WuRx es detectar WuC y activar el MR del dispositivo para la comunicación de datos. Después de recibir el WuC del dron, active los dispositivos con la misma dirección de máscara de subred, como dispositivos miembros en el mismo grupo al mismo tiempo. Luego competirán entre sí para cargar datos al dron en un solo salto. De esta forma, los dispositivos IoT en el mismo clúster pueden sincronizar la transmisión de datos. [9].

## **2.5 MURIST: Principio y Operaciones**

La selección del protocolo en las comunicaciones síncronas propone un protocolo MAC para transmisión de datos síncronas de un clúster de dispositivos IoT habilitados para WuR que se centran en evitar colisiones, acortar el retraso y reducir consumo de energía.

### **2.5.1 El principio de MURIST**

Para la recopilación de datos, se creó un WuC con la dirección común de un clúster, que fue emitida por el colector de datos. En MURIST, despertamos un clúster de dispositivos sincrónicamente en vez de hacerlo individualmente esto se realizó a través de una dirección de multidifusión. Las razones por la cual el diseño fue realizado son las siguientes:

- La velocidad de transmisión de datos WuC es más baja, en especial cuando el rango es más largo [5] [20].
- Una máscara de red (común para un clúster de dispositivos) es más corta que una dirección de unicast (única para cada dispositivo individual).

Por ejemplo, si utilizamos una red de muchos dispositivos podría adoptarse como la

dirección de multidifusión [11]. Los dispositivos que no se encuentre en un grupo correspondiente pero que pertenecen a una área superpuesta, volverán a suspensión profunda antes de que la máscara de red sea decodificada por completo [8]. Utilizando dirección multifunción acordaremos mucho el tiempo de ejecución, ya que WuC de multidifusión, tiene como objetivo activar un grupo de dispositivos de uno a muchos y si utilizamos WuC de unidifusión realizaría un dispositivo en específico. Considerando un clúster de N dispositivos y un colector de datos. En la transmisión unicast realizamos un envío de datos en conjunto con uno y solo uno de los elementos de otro conjunto, tanto para el enlace ascendente como para el enlace descendente. Entonces la recopilación de datos requerida N WuC más N marco de datos, transmisión que se realizará cuando se adopta la transmisión de unidifusión. Empleando nuestro protocolo, la duración contiene sólo una transmisión WuC más N transmisiones de tramas de datos, pero las colisiones aún deberán ser resueltas como se explicará a continuación.

---

**Algorithm 1: MURIST for Each Device**

---

```

1 Event initialization: A WuC from a data collector is
  correctly decoded
  Input : Max_attempt=7, Num_of_attempt=0, CW=32,
            $S_T = 0$ 
  Output:  $S_T = 1$  (successful transmission) or  $S_T = 0$ 
            (unsuccessful transmission)
2 while Num_of_attempt < Maximum_transmission_attempt do
  • Select a random BO slot from [0, CW-1];
  • Enable channel status assessment;
  if Channel status = busy then
    • Go to deep sleep; //: Another device is transmitting
    • Clear the BO counter;
  end
  while BO_slot_counter > 0 do
    • BO_slot_counter = BO_slot_counter - 1;
  end
  • Transmit a data packet to the data collector;
  • Wait for an ACK from the data collector;
  if ACK is received within ACKTimeout then
    •  $S_T = 1$ ;
    • Go to deep sleep;
    break
  end
  • Clear the BO counter;
  • Go to light sleep for transmission duration;
  • Num_of_attempt = Num_of_attempt + 1;
3 end

```

---

Figura 2: Protocolo MURIST para cada dispositivo

## 2.5.2 La Operación de MURIST

En la red IoT operada en base a MURIST todos los dispositivos deben seguir el algoritmo de acuerdo con la Figura 2. Cuando el preámbulo de un WuC es detectado por el WuRx de un dispositivo activa el MR para encender parcialmente el sueño ligero para este dar validación de direcciones WuC. Si se obtiene que la dirección decodificada es igual con la dirección de multidifusión y el dispositivo tiene datos que informar, el MR del dispositivo se despertará completamente y estará en modo activo. En el otro caso que el dispositivo no tengo datos que transmitir, volverá a sueño profundo después de que estuvo en sueño ligero y no participará en la contienda de acceso al canal. Para la recopilación de datos de un grupo se puede utilizar varias rondas de competencias de transmisión (cada una como un ciclo BO o solo un ciclo ) que se puede necesitar. Estará activo cada dispositivo en un ciclo BO.

Cuando los dispositivos están compitiendo por el acceso al canal durante cualquier ciclo BO, si el contador llega a 0 un dispositivo se puede considerar el mismo como ganador y el canal será evaluado como inactivo. Inmediatamente, transmite su paquete. No obstante, si varios dispositivos realizan la misma evaluación ahí es cuando tendremos como resultado una colisión. Es decir, un dispositivo gana la competencia cuando transmite sus datos con éxito si y sólo si es el único dispositivo que selecciona el intervalo BO mínimo. La transmisión de red finaliza cuando el dispositivo recibe un mensaje ACK. Seguidamente el dispositivo vuelve a sueño profundo. Por otra parte, los dispositivos que no ganaron la competencia de acceso al canal, eliminan sus cuentas regresivas de ranuras BO que les quedaban y concursarán por el acceso en la otra ronda eligiendo otro intervalo BO, desde  $[0, CW-1]$ . En el período que el dispositivo ganador transmite los datos el MR de los otros dispositivos permanecerán en el modo suspensión ligera. Cada dispositivo conoce el tiempo de duración de una transmisión de trama en curso. Este procedimiento se va a realizar hasta que todos los dispositivos hayan transmitido con éxito todos sus paquetes o hayan alcanzado un número máximo de intentos de transmisión

(M). El UAV siempre estará activo entonces debemos considerar que no se necesita ACK de un dispositivo final al recibir un WuC, el UAV siempre estará listo para recibir los datos.

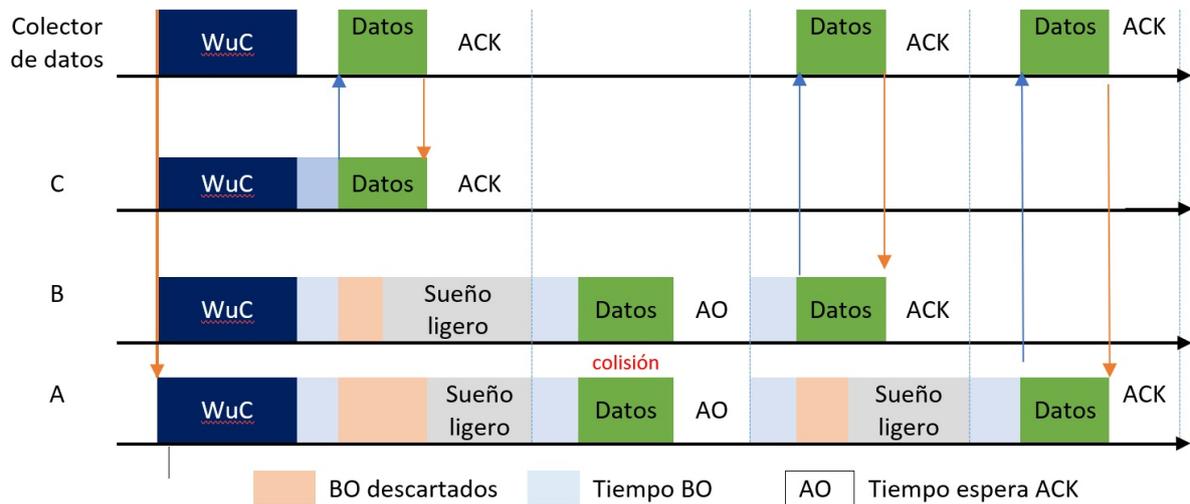


Figura 3: Transmisión basada en MURIST con 3 dispositivos compitiendo por el acceso al medio

(Fuente: Autor)

Por ejemplo, la Figura 3 ilustra el funcionamiento del protocolo MURIST para transmitir un solo paquete de datos en una red pequeña con tres dispositivos IoT A, B, C y un colector de datos. Se recibe un WuC común del colector de datos y los tres dispositivos compiten por la transmisión de datos. En la primera ronda, el dispositivo C fue el único dispositivo que eligió el número de ranura BO más bajo, por lo que ganó el juego. Luego transmite el paquete al colector de datos y espera un ACK. Una vez que se recibe el ACK del dron, el dispositivo C vuelve al modo de suspensión profunda. En la siguiente ronda de competencia, los dispositivos A y B eligen el mismo número de ranura BO. Así es como ocurren las colisiones. A partir de entonces, los dispositivos A y B siguen el mismo procedimiento hasta que hayan transmitido con éxito sus paquetes o alcanzado el límite máximo de transmisión.

# Capítulo III

## METODOLOGÍA

### 3.1 Tipo de Investigación

La presente investigación está orientada a la recolección de datos y el análisis interpretativo de una red basada en tecnología de radio de ultra baja potencia para comunicaciones fiables en internet de las cosas. Para el efecto se ha implementado un modelo de simulación del sistema propuesto, por medio del software Matlab; a partir de lo cual se realizará el respectivo análisis respectivo y demostrar que la comunicación fiable.

#### 3.1.1 Investigación Exploratoria

El tipo de investigación es exploratoria, la cual se realiza mediante un modelo de simulación por eventos discretos de una red basada en tecnología wake-up radio. Se analizan diferentes parámetros para maximizar la probabilidad de acceso satisfactorio y proporcionar comunicaciones IoT fiables. A partir de la simulación y análisis se adecuan los parámetros de la red para garantizar su disponibilidad.

## **3.2 Métodos, Técnicas e Instrumentos de Investigación**

### **3.2.1 Método Analítico**

El método analítico es sumamente útil en estudios de tipo descriptivo, es aplicado en estudios novedosos e inexplorados, esto se debe a que emplea herramientas que revelan relaciones esenciales y características fundamentales de su objeto de estudio. Podemos obtener con este método aciertos experimentales, como de los errores aprendiendo de ellos.

### **3.2.2 Modelo de Simulación**

El objetivo del modelo de simulación consiste en implementar ecuaciones que representan procesos, variables y relaciones entre variables de fenómenos del mundo real y que brindan indicaciones aproximadas de su comportamiento bajo diferentes gestiones de variables. La percepción del fenómeno real de la red será formalizada en un modelo de simulación y se analizará el efecto de diferentes alternativas.

## **3.3 Técnica de Recolección de Datos**

### **3.3.1 Observación**

En la presente investigación se utilizará la observación como técnica estructurante para estudiar con mayor precisión los parámetros que evaluaremos y visualizamos de manera ordenada.

## **3.4 Modelo del Sistema**

Considere una red IoT a gran escala que consta de varios clústeres de red, cada uno con un conjunto de dispositivos IoT habilitados para WuR. Los clústeres adyacentes pueden o no tener áreas de cobertura superpuestas, pero cada clúster tiene una dirección de

máscara de red de clúster única. Para recopilar datos, los nodos de referencia actúan como recopiladores de datos. Para cada misión de recolección de datos, un nodo de referencia vuela desde una base y sobre un área de interés para la recolección de datos. Durante la misión, habrá múltiples rondas de recopilación de datos, y cada ronda será responsable de recopilar datos de un solo grupo. Cada dispositivo IoT en la red está equipado con un WuRx asociado con su radio principal (MR). La tarea principal de WuRxs es detectar WuC y activar el MR del dispositivo para la comunicación de datos. Después de recibir el WuC del nodo de referencia, los dispositivos con la misma dirección de máscara de red, es decir, los dispositivos miembros del mismo grupo se activan al mismo tiempo. Luego competirán entre sí para cargar datos al nodo de referencia en un solo salto. De esta forma, los dispositivos IoT en el mismo clúster pueden sincronizar la transmisión de datos. Los dispositivos IoT habilitados para WuR operan en tres modos diferentes: sueño profundo, sueño ligero o activo. En el modo de sueño profundo, la MR está en estado de suspensión y el WuRx siempre está encendido. En el modo de sueño ligero, la función del MR está parcialmente activada, capaz de decodificar y verificar WuCs. En modo activo, el MR está completamente operativo y realiza transferencias de datos. Cada ronda de recopilación de datos se desencadena mediante mensajes WuC de multidifusión desde los nodos de referencia y funciona en modo iniciado por el receptor. No cubre todos los dispositivos en la misma región. La misma suposición se aplica al tráfico ascendente para transferencias de paquetes. El nodo de referencia permanece estable durante cada ronda de recopilación de datos para cualquier grupo. La agrupación de dispositivos que diseñen trayectorias óptimas de nodos de referencia para recopilar datos en múltiples grupos en una región de interés está fuera del alcance de este estudio. Asimismo, no se considera el consumo de energía resultante del movimiento del nodo de referencia. Además, se asumirá que el canal entre el nodo de referencia y cualquier dispositivo miembro está libre de errores tanto para el enlace ascendente como para el enlace descendente y el retraso de propagación es insignificante.

### 3.4.1 Métricas de rendimiento

#### Probabilidad de acceso satisfactorio

Distribución de transmisiones exitosas y descartadas, y número de ciclos BO para una transmisión exitosa: Sea  $\alpha = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$  sea el vector de probabilidad inicial de los estados transitorios. Entonces, la probabilidad de absorber en  $a_i$  en el tiempo  $t$  es dado por:

$$\gamma_i(t) = \alpha T^{t-1} t_i, \quad i = 1, \dots, M + 1; \quad t \geq 1. \quad (1)$$

En este caso podemos decir que evidentemente

$$\gamma_i(t) = 0, \quad i = 1, \dots, M + 1; \quad t \leq 0. \quad (2)$$

a partir de aquí, obtenemos la probabilidad de que el dispositivo logra transmitir en el  $i$ -ésimo intento como

$$\gamma_i = \sum_{t \geq 1} \gamma_i(t) = \alpha (I - T)^{-1} t_i, \quad i = 1, \dots, M; \quad (3)$$

haciendo que la probabilidad de que el dispositivo descarte el paquete como

$$P_d = \alpha (I - T)^{-1} t_{M+1} \quad (4)$$

obteniendo la probabilidad de transmisión exitosa como

$$P_s = \sum_{i=1}^M \gamma_i = \alpha (I - T)^{-1} \sum_{i=1}^M t_i = 1 - P_d \quad (5)$$

donde  $I$  es un vector de columna de unos con un tamaño adecuado.

Usando la fórmula (3.6), podemos escribir el número medio de intentos (o NO ciclos) para un dispositivo exitoso como

$$\epsilon[X_{ciclos}^{BO}] = \frac{1}{P_s} \sum_{i=1}^M i\gamma_i = \frac{\alpha(I-T)^{-1} \sum_{i=1}^M it_i}{\alpha(I-T)^{-1} \sum_{i=1}^M t_i} \quad (6)$$

El tiempo de absorción medido en número de intervalos es igual al número de intervalos de BO más un intervalo de transmisión por ciclo de BO. Por tanto, se puede obtener que el número medio de ranuras BO utilizadas para la absorción es

$$\epsilon[X_{ranuras}^{BO}] = \frac{1}{P_s} \alpha(I-T)^{-2} \sum_{i=1}^M t_i - \epsilon[X_{ciclos}^{BO}] = \frac{\alpha(I-T)^{-1} (\sum_{i=1}^M t_i - \sum_{i=1}^M it_i)}{\alpha(I-T)^{-1} \sum_{i=1}^M t_i} \quad (7)$$

Distribución del número de colisiones: aquí derivamos la distribución del número total de colisiones para un dispositivo que al final logra transmitir con éxito

Denotado por  $C_r(m, n)$  la probabilidad de que a partir del  $m$ -ésimo ciclo BO en adelante, con  $n$  otros dispositivos que hayan transmitido con éxito durante los  $m - 1$  ciclos BO anteriores, el dispositivo etiquetado sufra  $r$  colisiones y finalmente realice una transmisión exitosa. La distribución del número de colisiones para un nodo exitoso,  $[C_0, C_1, \dots, C_{M-1}]$  está dado por:

$$P[C = r] = \frac{C_r[1, 0]}{P_s}, \quad r = 0, \dots, M - 1 \quad (8)$$

## Retardo

Sea  $D$  una variable aleatoria que representa el retraso hasta que el dispositivo etiquetado haya transmitido con éxito el paquete o lo haya descartado. Después,

$$P(D = t) = \sum_{i=1}^M \gamma_i (t - i(L - 1)) + \gamma M + 1 (t - (M - 1)(L - 1) + 1) \quad (9)$$

Las distribuciones de retardo condicionadas al envío y descarte exitoso de paquetes por parte del dispositivo etiquetado son

$$P_s(D = t) = \frac{1}{P_s} \sum_{i=1}^M \gamma_i(t - 1(L - 1)) \quad (10)$$

y

$$P_d(D = t) = \frac{1}{P_d} \gamma M + 1(t - (M - 1)(L - 1) + 1) \quad (11)$$

A partir de la distribución de latencia derivada, podemos obtener la latencia de acceso promedio, que es principalmente importante para los paquetes transmitidos con éxito. El retraso de acceso esperado, indicado por  $D_{st}$ , se define como el tiempo promedio desde que el mensaje WuC enviado por el recopilador de datos llega a WuRx hasta que el paquete de datos se envía correctamente desde MR y recibe un ACK. Por lo tanto,  $D_{st}$  se puede calcular como

$$D_{st} = T_{wuc} + \epsilon[X_{ciclos}^{BO}]T_t + \epsilon[X_{ciclos}^{BO}]T_{ranura} \quad (12)$$

donde  $T_{wuc}$ ,  $\epsilon[X_{ciclos}^{BO}]$  y  $\epsilon[X_{ranuras}^{BO}]$  son la duración de WuC, el número promedio de ciclos de BO y las ranuras horarias de BO;  $T_t$  y  $T_{ranura}$  son el retraso esperado desde que el dispositivo gana la contienda hasta que el recopilador de datos recibe correctamente un paquete (incluida la recepción de un ACK) y el intervalo de tiempo de inactividad, respectivamente. Es más  $T_{wuc}$ ,  $\epsilon[X_{ciclos}^{BO}]$  y  $\epsilon[X_{ranuras}^{BO}]$  puede obtenerse por las fórmulas (3.6) y (3.7), respectivamente.  $T_t$  esta dado por

$$T_t = T_{MST} + T_{data} + T_{SIFS} + T_{ack} \quad (13)$$

donde  $T_{MST}$ ,  $T_{data}$ ,  $T_{SIFS}$ , y  $T_{ack}$  son el tiempo necesario para la activación completa

de la MCU, la transmisión de paquetes de datos, el espacio entre tramas corto (SIFS) y la transmisión de tramas ACK, respectivamente. La duración de la transmisión para D se cuenta en número de intervalos, mientras que Dst se mide en segundos. Están conectados entre sí a través de la duración de una ranura BO.

### Energía

Definido como Est, es representado como la energía promedio que se necesita un dispositivo para transmitir satisfactoriamente un paquete. Se calcula desde que su MR se despierta del sueño profundo al llegar de un Wuc hasta que sea entregado satisfactoriamente y ahí se recibirá un ACK. Est puede ser calculado como:

$$E_{st} = \in [X_{ranuras}^{BO}]E_{ranura} + E_{tx} + \in [C]E_c + (\in [X_{ciclos}^{BO}] - \in [C] - 1)E_{id} \quad (14)$$

Donde  $E_{tx}$ ,  $E_c$ ,  $E_{ranuras}$  y  $E_{id}$  son el consumo de energía para una transmisión de paquetes exitosa. El número medio de colisiones,  $\in [C]$ , lo podemos tener de la distribución del número de colisiones presentadas en la fórmula (3.8).

$E_{tx}$  y  $E_c$  se puede obtener de la siguiente manera:

$$E_{tx} = E_{MST} + E_{datos} + E_{SIFS} + E_{ack}, E_c = E_{MST} + E_{datos} + E_{SIFS} + E_{out} \quad (15)$$

donde  $E_{datos}$ ,  $E_{MST}$ ,  $E_{SIFS}$ ,  $E_{ack}$  y  $E_{out}$  son la energía que se consume en la transmisión de paquetes de datos, activación completa de MCU, SIFS, recepción ACK y ACKTimeout, respectivamente.

## 3.5 Validación de la Solución Propuesta

El modelo de comunicación de la red propuesto se basa en un protocolo MAC basado en WuR, que inicia varias transmisiones de paquetes sincrónicos desde un clúster de

dispositivos a través de un mensaje de multidifusión WuC común. Para verificar la precisión del modelo, se desarrollará un simulador por eventos discretos en MATLAB que imita el comportamiento del protocolo de comunicación y se realizarán extensivas simulaciones considerando un clúster de red con un número de dispositivos que varía en el rango de  $N$ , con  $N = 2n + 2$  para  $n \geq 1$  y  $n < 10$ .

El rendimiento del protocolo se evaluará en comparación con el rendimiento de un protocolo de referencia denominado CSMA-WuR que ha sido propuesto para redes IoT habilitadas para WuR (Ghose, Li, Pla, 2018). Para ello se considerarán tres métricas fundamentales: probabilidad de transmisión satisfactoria ( $P_s$ ), retardo en el acceso (D) y consumo energético (E). Se utilizarán gráficos superpuestos para comparar la evolución de las métricas antes mencionadas en función de  $N$ .

Finalmente, para garantizar comunicaciones fiables en la red en base a los requerimientos de un determinado servicio, se requiere una configuración adecuada de ciertos parámetros de comunicación como el número de retransmisiones permitidas y el tamaño de la ventana de contención. Para encontrar la configuración adecuada de dichos parámetros se fijará un alto nivel de transmisión confiable apuntado a  $P_s \geq 95\%$ . Entonces, se determinará un valor óptimo para estos parámetros a partir de un conjunto de valores que arrojan el objetivo  $P_s \geq 0.95$  para un determinado valor de número de dispositivos en el clúster ( $N$ ).

## Capítulo IV

# OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

### 4.1 Variables de la investigación

VARIABLES	CONCEPTO	INDICADORES	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
Independiente Topología de Red	Se define como el conjunto de dispositivos que conforman un clúster y se comunican por medio de un protocolo basado en WuR.	Número de dispositivos en el clúster Duración de la ventana de contención	Observación directa a través de un modelo de simulación de la red que consiste en varios clústeres de red que atiende un conjunto de flujos de tráfico (Matlab)
Dependiente Rendimiento de Red	Se define como la cantidad de dispositivos que han accedido satisfactoriamente a la red con un determinado retardo y consumo	Probabilidad de acceso satisfactorio Retardo en el acceso Consumo energético	

Tabla 1: Operacionalización de las variables

# Capítulo V

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el objetivo de alcanzar el nivel de transmisión confiable  $P_s \geq 95\%$ , se realizó la simulación en un rango de nodos  $N$ , con  $N = 2n + 2$  para  $n \geq 1$  y  $n \leq 9$  fueron probadas diferentes tamaños de ventana de contención en un rango de  $CW$ , con  $CW = CW + 1$ ,  $CW \geq 1$  y  $CW \leq 32$ . En la tabla número 1 se muestra la cantidad de intentos  $M$ , para alcanzar la transmisión exitosa.

En la tabla 2 se presentan los resultados para  $N = 4$ ; con la finalidad de indentificar el menor tamaño de  $CW$  y el menor número de intentos para alcanzar un  $P_s \geq 95\%$ . Por ejemplo para  $CW = 2$ ,  $M = 16$ ; para  $CW = 6$ ,  $M = 6$ , por lo que los resultados en donde  $M$  sigue siendo 6 y si  $CW > 6$ , son descartados. El mejor resultado se alcanza con 4 intentos y una ventana de contención de 22.

CW	M	CW	M
2	16	17	5
3	9	18	5
4	8	19	5
5	7	20	5
6	6	21	5
7	6	22	4
8	6	23	4
9	5	24	4
10	5	25	4
11	5	26	4
12	5	27	4
13	5	28	4
14	5	29	4
15	5	30	4
16	5	31	4
		32	4

Tabla 2:  $N = 4$ ,  $CW \geq 2$  y  $CW \leq 32$ ,  $P_s \geq 95\%$ , menor número de (M), resultados con color rojo

En la tabla 3 se presentan los resultados para  $N = 6$ ; con la finalidad de indentificar el menor tamaño de  $CW$  y el menor número de intentos para alcanzar un  $P_s \geq 95\%$ . Por ejemplo para  $CW = 2$ ,  $M = 45$ ; para  $CW = 14$ ,  $M = 7$ , por lo que los resultados en donde  $M$  sigue siendo 7 y si  $CW > 14$ , son descartados. El mejor resultado se alcanza con 6 intentos y una ventana de contección de 32.

CW	M	CW	M
2	45	17	7
3	19	18	7
4	13	19	7
5	11	20	7
6	10	21	7
7	9	22	7
8	9	23	7
9	8	24	7
10	8	25	7
11	8	26	7
12	8	27	7
13	8	28	7
14	7	29	7
15	7	30	7
16	7	31	7
		32	6

Tabla 3:  $N = 6$ ,  $CW \geq 2$  y  $CW \leq 32$ ,  $P_s \geq 95\%$ , menor número de (M), resultados con color rojo

En la tabla 4 se presentan los resultados para  $N = 8$ ; con la finalidad de indentificar el menor tamaño de  $CW$  y el menor número de intentos para alcanzar un  $P_s \geq 95\%$ . Por ejemplo para  $CW = 3$ ,  $M = 34$ ; para  $CW = 13$ ,  $M = 10$ , por lo que los resultados en donde  $M$  sigue siendo 10 y si  $CW > 13$ , son descartados. El mejor resultado se alcanza con 9 intentos y una ventana de contección de 19.

CW	M	CW	M
2	/	17	10
3	34	18	10
4	22	19	9
5	17	20	9
6	15	21	9
7	13	22	9
8	12	23	9
9	12	24	9
10	11	25	9
11	11	26	9
12	11	27	9
13	10	28	9
14	10	29	9
15	10	30	9
16	10	31	9
		32	9

Tabla 4:  $N = 8$ ,  $CW \geq 2$  y  $CW \leq 32$ ,  $P_s \geq 95\%$ , menor número de (M), resultados con color rojo

En la tabla 5 se presentan los resultados para  $N = 10$ ; con la finalidad de indentificar el menor tamaño de  $CW$  y el menor número de intentos para alcanzar un  $P_s \geq 95\%$ . Por ejemplo para  $CW = 4$ ,  $M = 34$ ; para  $CW = 13$ ,  $M = 13$ , por lo que los resultados en donde  $M$  sigue siendo 13 y si  $CW > 13$ , son descartados. El mejor resultado se alcanza con 11 intentos y una ventana de conteción de 25.

CW	M	CW	M
2	/	17	12
3	/	18	12
4	34	19	12
5	25	20	12
6	21	21	12
7	18	22	12
8	17	23	12
9	16	24	12
10	15	25	11
11	14	26	11
12	14	27	11
13	13	28	11
14	13	29	11
15	13	30	11
16	13	31	11
		32	11

Tabla 5:  $N = 10$ ,  $CW \geq 2$  y  $CW \leq 32$ ,  $P_s \geq 95\%$ , menor número de (M), resaltados con color rojo

En la tabla 6 se presentan los resultados para  $N = 12$ ; con la finalidad de indentificar el menor tamaño de  $CW$  y el menor número de intentos para alcanzar un  $P_s \geq 95\%$ . Por ejemplo para  $CW = 5$ ,  $M = 36$ ; para  $CW = 22$ ,  $M = 14$ , por lo que los resultados en donde  $M$  sigue siendo 14 y si  $CW > 22$ , son descartados. El mejor resultado se alcanza con 13 intentos y una ventana de contección de 31.

CW	M	CW	M
2	/	17	15
3	/	18	15
4	/	19	15
5	36	20	15
6	29	21	15
7	24	22	14
8	22	23	14
9	20	24	14
10	19	25	14
11	18	26	14
12	17	27	14
13	17	28	14
14	16	29	14
15	16	30	14
16	16	31	13
		32	13

Tabla 6:  $N = 12$ ,  $CW \geq 2$  y  $CW \leq 32$ ,  $P_s \geq 95\%$ , menor número de (M), resaltados con color rojo

En la tabla 7 se presentan los resultados para  $N = 14$ ; con la finalidad de indentificar el menor tamaño de  $CW$  y el menor número de intentos para alcanzar un  $P_s \geq 95\%$ . Por ejemplo para  $CW = 6$ ,  $M = 39$ ; para  $CW = 21$ ,  $M = 17$ , por lo que los resultados en donde  $M$  sigue siendo 17 y si  $CW > 21$ , son descartados. El mejor resultado se alcanza con 16 intentos y una ventana de contección de 26.

CW	M	CW	M
2	/	17	18
3	/	18	18
4	/	19	18
5	/	20	18
6	39	21	17
7	32	22	17
8	28	23	17
9	26	24	17
10	24	25	17
11	22	26	16
12	21	27	16
13	21	28	16
14	20	29	16
15	19	30	16
16	19	31	16
		32	16

Tabla 7:  $N = 14$ ,  $CW \geq 2$  y  $CW \leq 32$ ,  $P_s \geq 95\%$ , menor número de (M), resaltados con color rojo

En la tabla 8 se presentan los resultados para  $N = 16$ ; con la finalidad de indentificar el menor tamaño de  $CW$  y el menor número de intentos para alcanzar un  $P_s \geq 95\%$ . Por ejemplo para  $CW = 7$ ,  $M = 42$ ; para  $CW = 25$ ,  $M = 19$ , por lo que los resultados en donde  $M$  sigue siendo 19 y si  $CW > 25$ , son descartados. El mejor resultado se alcanza con 18 intentos y una ventana de contección de 32.

CW	M	CW	M
2	/	17	22
3	/	18	21
4	/	19	21
5	/	20	21
6	/	21	20
7	42	22	20
8	36	23	20
9	32	24	20
10	29	25	19
11	27	26	19
12	26	27	19
13	25	28	19
14	24	29	19
15	23	30	19
16	22	31	19
		32	18

Tabla 8:  $N = 16$ ,  $CW \geq 2$  y  $CW \leq 32$ ,  $P_s \geq 95\%$ , menor número de (M), resaltados con color rojo

En la tabla 9 se presentan los resultados para  $N = 18$ ; con la finalidad de indentificar el menor tamaño de  $CW$  y el menor número de intentos para alcanzar un  $P_s \geq 95\%$ . Por ejemplo para  $CW = 8$ ,  $M = 45$ ; para  $CW = 25$ ,  $M = 22$ , por lo que los resultados en donde  $M$  sigue siendo 22 y si  $CW > 25$ , son descartados. El mejor resultado se alcanza con 21 intentos y una ventana de contección de 29.

CW	M	CW	M
2	/	17	26
3	/	18	25
4	/	19	24
5	/	20	24
6	/	21	24
7	/	22	23
8	45	23	23
9	40	24	23
10	36	25	22
11	33	26	22
12	31	27	22
13	29	28	22
14	28	29	21
15	27	30	21
16	26	31	21
		32	21

Tabla 9:  $N = 18$ ,  $CW \geq 2$  y  $CW \leq 32$ ,  $P_s \geq 95\%$ , menor número de (M), resaltados con color rojo

En la tabla 10 se presentan los resultados para  $N = 20$ ; con la finalidad de indentificar el menor tamaño de  $CW$  y el menor número de intentos para alcanzar un  $P_s \geq 95\%$ . Por ejemplo para  $CW = 9$ ,  $M = 48$ ; para  $CW = 25$ ,  $M = 25$ , por lo que los resultados en donde  $M$  sigue siendo 25 y si  $CW > 25$ , son descartados. El mejor resultado se alcanza con 24 intentos y una ventana de contención de 29.

CW	M	CW	M
2	/	17	29
3	/	18	29
4	/	19	28
5	/	20	27
6	/	21	27
7	/	22	26
8	/	23	26
9	48	24	26
10	43	25	25
11	39	26	25
12	37	27	25
13	34	28	25
14	33	29	24
15	32	30	24
16	30	31	24
		32	24

Tabla 10:  $N = 20$ ,  $CW \geq 2$  y  $CW \leq 32$ ,  $P_s \geq 95\%$ , menor número de (M), resaltados con color rojo

A partir de los resultados mostrados en la tablas anteriores, se puede verificar que la probabilidad obtenida de transmisiones exitosas para MURIST,  $P_s$ , depende del número de dispositivos, y del tamaño de la ventana de contención. Se pudo observar que a medida que aumenta el número de dispositivos, es decir, cuando aumenta  $N$ , la  $P_s$  de la red es menor. Esto se debe a que a medida que aumenta la cantidad de dispositivos en la red, ocurren más conflictos. Por otro lado, un tamaño de  $CW$  más grande puede lograr un  $P_s$  más alto. Esto se debe a que un tamaño de  $CW$  más grande brinda a los dispositivos un rango más amplio de valores para su selección de ranuras de  $BO$ , lo que resulta en una menor probabilidad de colisión en cada ciclo de  $BO$ . Además, se exploró cómo se puede mejorar la entrega confiable con la configuración de parámetros adecuada mientras se considera el rendimiento de la latencia de acceso. Para estudiar este comportamiento, reconfiguramos  $M$  a un valor mayor para otro conjunto de evaluación numérica. De esto podemos ver que  $P_s$  aumenta significativamente con  $M$  y puede alcanzar casi el 100% de probabilidad de transmisión exitosa cuando  $M$  es lo suficientemente grande. En

general, para lograr  $P_s \geq 95\%$ ,  $M$  debe configurarse a un valor mayor que  $N$ . Por otro lado, una  $M$  más grande conduce a una mayor demora de acceso ya que se permiten más intentos de transmisión. Con esto se obtendrá una igualdad entre transmisiones confiables y demoras

Para poder obtener el retardo, se tomo encuentra los valores marcados en rojo los cuales eran los valores mínimos para una transmisión más efectiva como podemos ver, se descartó los valores repetidos en  $M$ .

Cuando se utilizó la tabla de  $N = 4$  se obtuvo los siguientes resultados:

CW	M	D
2	16	28.5412
3	9	19.4988
4	8	18.1418
5	7	17.2528
6	6	16.9113
9	5	17.6201
22	4	24.617

Tabla 11: Retardo cuando  $N = 4$

Utilizando la tabla de  $N = 6$  se obtuvo los siguientes resultados:

CW	M	D
2	16	77.7756
3	9	36.8667
4	8	28.5711
5	7	25.8267
6	6	24.7292
9	8	24.0256
14	7	25.0732
32	6	36.4460

Tabla 12: Retardo cuando  $N = 6$

Utilizando la tabla de  $N = 8$  se obtuvo los siguientes resultados:

<b>CW</b>	<b>M</b>	<b>D</b>
3	34	66.8372
4	22	45.5261
5	17	37.8067
6	15	34.6303
7	13	32.3929
8	12	31.3860
10	11	30.9403
13	10	31.3903
19	9	33.9528

Tabla 13: Retardo cuando  $N = 8$

Utilizando la tabla de  $N = 10$  se obtuvo los siguientes resultados:

<b>CW</b>	<b>M</b>	<b>D</b>
4	34	70.5195
5	25	54.2343
6	21	47.1516
7	18	42.8388
8	17	41.1288
9	16	39.9177
10	15	38.9985
11	14	38.1876
13	13	37.8580
17	12	38.9177
25	11	42.9274

Tabla 14: Retardo cuando  $N = 10$

Utilizando la tabla de  $N = 12$  se obtuvo los siguientes resultados:

CW	M	D
5	36	77.1904
6	29	63.7038
7	24	55.7336
8	22	52.0083
9	20	49.1317
10	19	47.7059
11	18	46.5714
12	17	45.5781
14	16	45.0787
17	15	45.3701
22	14	47.1907
31	13	51.9305

Tabla 15: Retardo cuando  $N = 12$

Utilizando la tabla de  $N = 14$  se obtuvo los siguientes resultados:

CW	M	D
6	39	66.9411
7	32	59.1431
8	28	54.6244
9	26	51.9202
10	24	50.1206
11	22	48.8636
12	21	48.1636
14	20	47.6886
15	19	47.8002
17	18	47.8665
21	17	49.4444
26	16	52.7688

Tabla 16: Retardo cuando  $N = 14$

Utilizando la tabla de  $N = 16$  se obtuvo los siguientes resultados:

CW	M	D
7	42	93.5094
8	36	82.0094
9	32	74.7412
10	29	69.6886
11	27	66.3691
12	26	64.6080
13	25	63.1701
14	24	61.9590
15	23	60.8777
16	22	59.8272
18	21	59.2728
21	20	59.4722
25	19	60.4762
32	18	63.7804

Tabla 17: Retardo cuando  $N = 16$

Utilizando la tabla de  $N = 18$  se obtuvo los siguientes resultados:

CW	M	D
8	45	101.9661
9	40	91.6105
10	36	84.3075
11	33	79.1248
12	31	75.6627
13	29	72.6289
14	28	71.0588
15	27	69.7049
16	26	68.4871
18	25	67.7007
19	24	66.6563
22	23	66.0327
25	22	67.0327
29	21	67.9886

Tabla 18: Retardo cuando  $N = 18$

Utilizando la tabla de  $N = 20$  se obtuvo los siguientes resultados:

CW	M	D
9	48	110.5004
10	43	100.3542
11	39	92.9299
12	37	88.6086
13	34	83.8967
14	33	81.8837
15	32	80.1835
16	30	77.4842
17	29	76.4842
19	28	75.2284
20	27	74.1022
22	26	73.4963
25	25	73.6347
29	24	74.5947

Tabla 19: Retardo cuando  $N = 20$

El rendimiento de la latencia está representado por la función de distribución acumulativa (CDF) de la latencia de acceso con la configuración: con los valores marcados en rojo de las tablas anteriores, respectivamente. La razón por la que establecemos que  $M > 10$  da este valor como resultado un 100% de posibilidades de una transmisión exitosa con un retardo mayor para todos los grupos de dispositivos configurados, pero cuando se compara la distribución de demoras con la distribución de  $M < 10$ , esta alta confiabilidad se refleja en demoras menores, por el precio esto se debe a que cuando  $M$  es mayor, los dispositivos de la red tienen más oportunidades de transmitir, lo que genera mayores retrasos, es decir, los paquetes pasan más tiempo en el búfer antes de enviarse. La transferencia fue exitosa. Para valores más bajos de  $M$ , cuando la red es grande, en comparación con redes pequeñas, esto se debe a que las redes más grandes con menor  $M$  experimentan una mayor pérdida de paquetes porque los dispositivos tienen menos oportunidades de transmitir. Paquetes en configuraciones de red donde  $M < N$  se transmite con éxito con menos retraso (es decir, cuando  $M = 7$ , los valores más altos de  $N$  requieren menos ranuras  $BO$ , como se muestran en las tablas de resultados

De la misma manera que el retardo para obtener los resultados de la energía medidos

en  $mJ$ , se consideraron los valores marcados en rojo.

Cuando se utilizó la tabla de  $N = 4$  se obtuvo los siguientes resultados:

CW	M	E
2	16	0.418425
3	9	0.273126
4	8	0.240219
5	7	0.224978
6	6	0.21346
9	5	0.204844
22	4	0.228206

Tabla 20: Energía cuando  $N = 4$

Utilizando la tabla de  $N = 6$  se obtuvo los siguientes resultados:

CW	M	E
2	16	0.594543
3	9	0.336814
4	8	0.299458
5	7	0.269494
6	6	0.299431
9	8	0.288242
14	7	0.280247
32	6	0.321976

Tabla 21: Energía cuando  $N = 6$

Utilizando la tabla de  $N = 8$  se obtuvo los siguientes resultados:

CW	M	E
3	34	0.941302
4	22	0.622756
5	17	0.507494
6	15	0.452505
7	13	0.41284
8	12	0.392301
10	11	0.373506
13	10	0.361435
19	9	0.35762

Tabla 22: Energía cuando  $N = 8$

Utilizando la tabla de  $N = 10$  se obtuvo los siguientes resultados:

CW	M	E
4	34	0.976485
5	25	0.733647
6	21	0.627827
7	18	0.55815
8	17	0.52658
9	16	0.50005
10	15	0.450657
11	14	0.464962
13	13	0.446556
17	12	0.435158
25	11	0.438069

Tabla 23: Energía cuando  $N = 10$

Utilizando la tabla de  $N = 12$  se obtuvo los siguientes resultados:

CW	M	E
5	36	1.05603
6	29	0.855979
7	24	0.73355
8	22	0.674329
9	20	0.627374
10	19	0.603259
11	18	0.577212
12	17	0.551957
14	16	0.536513
17	15	0.516223
22	14	0.507008
31	13	0.515512

Tabla 24: Energía cuando  $N = 12$

Utilizando la tabla de  $N = 14$  se obtuvo los siguientes resultados:

<b>CW</b>	<b>M</b>	<b>E</b>
6	39	1.15456
7	32	0.961737
8	28	0.856173
9	26	0.787313
10	24	0.741028
11	22	0.695839
12	21	0.668803
14	20	0.641108
15	19	0.628127
17	18	0.606694
21	17	0.589931
26	16	0.586235

Tabla 25: Energía cuando  $N = 14$

Utilizando la tabla de  $N = 16$  se obtuvo los siguientes resultados:

<b>CW</b>	<b>M</b>	<b>E</b>
7	42	1.25123
8	36	1.08369
9	32	0.974694
10	29	0.898886
11	27	0.846782
12	26	0.811767
13	25	0.784224
14	24	0.758969
15	23	0.739035
16	22	0.718335
18	21	0.698405
21	20	0.682644
25	19	0.668928
32	18	0.663813

Tabla 26: Energía cuando  $N = 16$

Utilizando la tabla de  $N = 18$  se obtuvo los siguientes resultados:

CW	M	E
8	45	1.48042
9	40	1.20404
10	36	1.09465
11	33	1.01273
12	31	0.962741
13	29	0.914026
14	28	0.883137
15	27	0.854591
16	26	0.835782
18	25	0.809952
19	24	0.79184
22	23	0.772992
25	22	0.748379
29	21	0.741625

Tabla 27: Energía cuando  $N = 18$

Utilizando la tabla de  $N = 20$  se obtuvo los siguientes resultados:

CW	M	E
9	48	1.45949
10	43	1.31695
11	39	1.19994
12	37	1.13856
13	34	1.06414
14	33	1.02945
15	32	0.990536
16	30	0.957379
17	29	0.930688
19	28	0.902021
20	27	0.876843
22	26	0.859466
25	25	0.840508
29	24	0.825564

Tabla 28: Energía cuando  $N = 20$

En términos de consumo de energía, cuando  $M$  es de 4 a 50, aumenta con la cantidad de dispositivos en el clúster. Esto significa que a mayor  $M$ , los paquetes pasan más tiempo en el búfer antes de ser transmitidos. Por lo tanto, consume más energía. Por otro lado, para valores más bajos de  $M$ , el consumo de energía disminuye ligeramente a medida

que aumenta la cantidad de dispositivos en el clúster. Esto se debe al hecho mencionado anteriormente de que las redes más grandes con menor  $M$  experimentan mayores tasas de pérdida de paquetes. Esto significa que el número promedio de ranuras BO requeridas por transmisión exitosa disminuye a medida que aumenta el número de dispositivos, y para un número  $N$  dado, el valor de  $M$  se establece relativamente bajo. Cuantas menos oportunidades de retransmisión, mayor será la tasa de pérdida de paquetes esperada. Sin embargo, para aquellos dispositivos "afortunados" que transmiten con éxito el paquete, este resultado significa que eligieron un valor más bajo de ranuras BO. Además, cuanto mayor sea el valor  $CW$ , mayor será el consumo de energía. Esto se debe a que un  $CW$  más grande significa que, en promedio, se seleccionan más ranuras BO para una transmisión exitosa. Un  $CW$  más grande consume más energía porque un dispositivo necesita evaluar el estado de transmisión de otros dispositivos al verificar la ocupación del canal en cada paso de cuenta regresiva de BO.

Ahora para demostrar que nuestro protocolo de MURIST funciona mejor que CSMA se realizó la siguiente comparación. Tomando en cuenta 3 eventos dentro del rango de  $M$  que serán los siguientes:

Cuando  $M = 4$ ,  $N = 2n + 2$  para  $n \geq 3$  y  $n \leq 9$  y  $CW = \{16, 32\}$ .

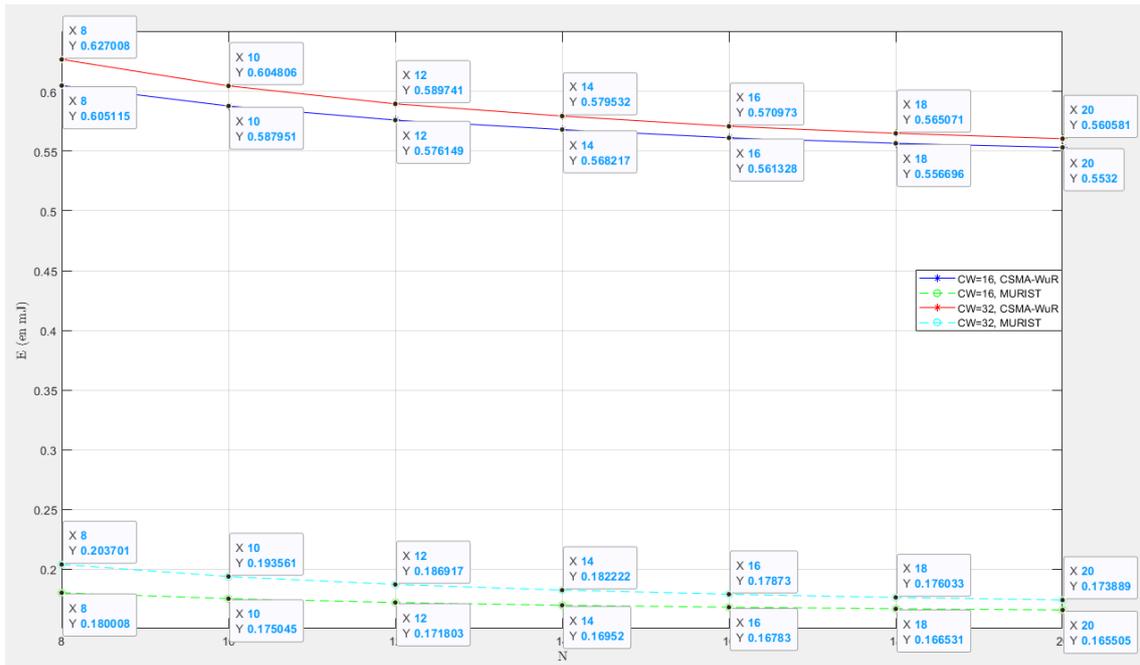


Figura 4: Comparación Energía cuando  $M = 4$ ,  $N = 2n + 2$  para  $n \geq 3$  y  $n \leq 9$ ,  $CW = \{16, 32\}$

(Fuente: Autor)

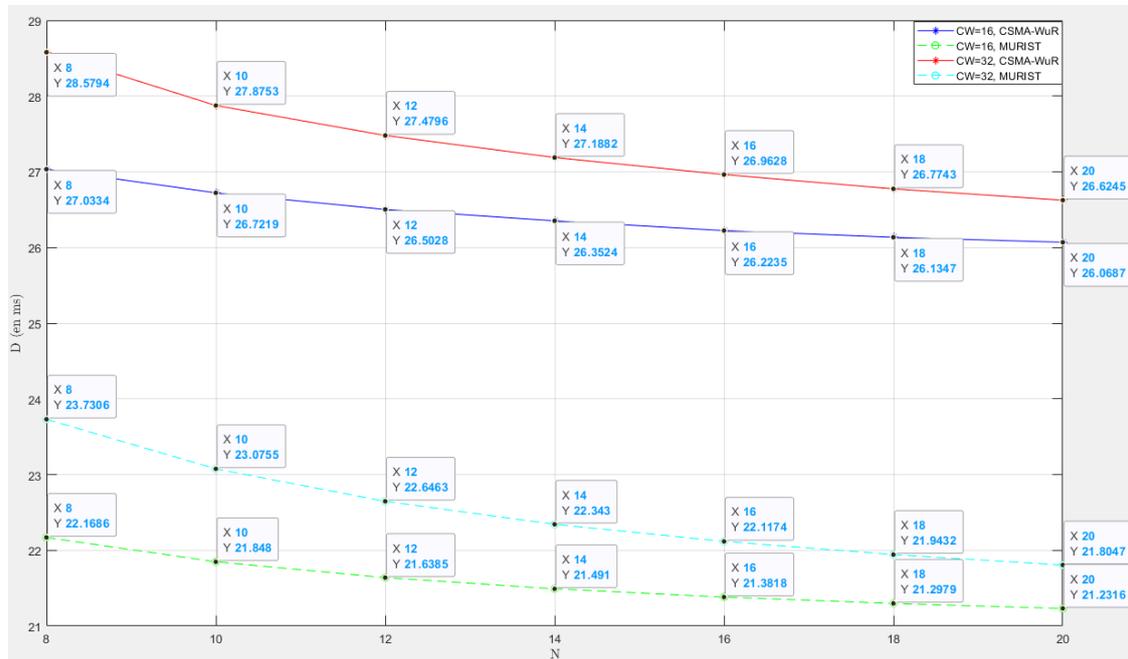


Figura 5: Comparación Retardo cuando  $M=4$ ,  $N = 2n + 2$  para  $n \geq 3$  y  $n \leq 9$ ,  $CW = \{16, 32\}$

(Fuente: Autor)

Cuando  $M = 10$ ,  $N = 2n + 2$  para  $n \geq 3$  y  $n \leq 9$  y  $CW = [16\ 32]$ .

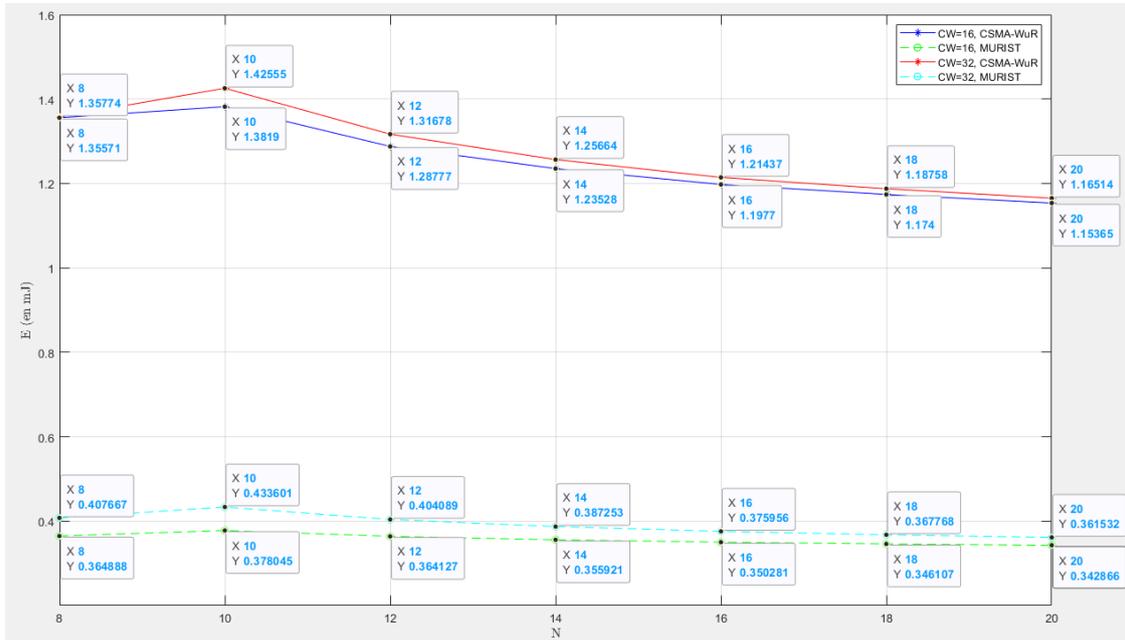


Figura 6: Comparación Energía cuando  $M=10$ ,  $N = 2n + 2$  para  $n \geq 3$  y  $n \leq 9$ ,  $CW = \{16, 32\}$

(Fuente: Autor)

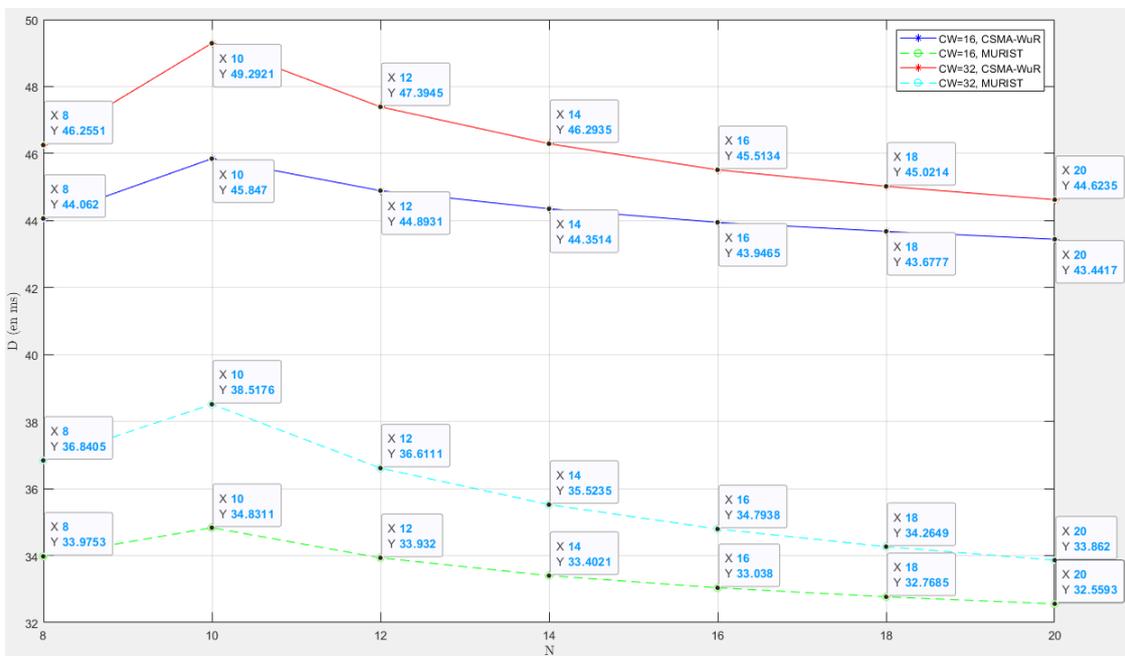


Figura 7: Comparación Retardo cuando  $M=10$ ,  $N = 2n + 2$  para  $n \geq 3$  y  $n \leq 9$ ,  $CW = \{16, 32\}$

(Fuente: Autor)

Cuando  $M = 16$ ,  $N = 2n + 2$  para  $n \geq 3$  y  $n \leq 9$  y  $CW = [16\ 32]$ .

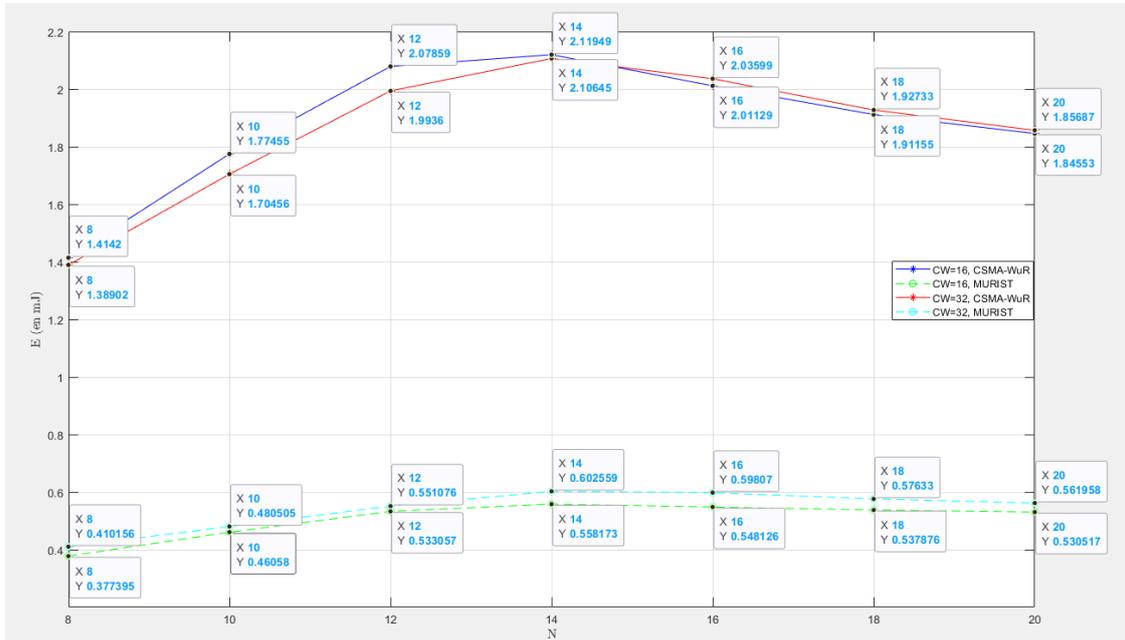


Figura 8: Comparación Energía cuando  $M=16$ ,  $N = 2n + 2$  para  $n \geq 3$  y  $n \leq 9$ ,  $CW = \{16, 32\}$

(Fuente: Autor)

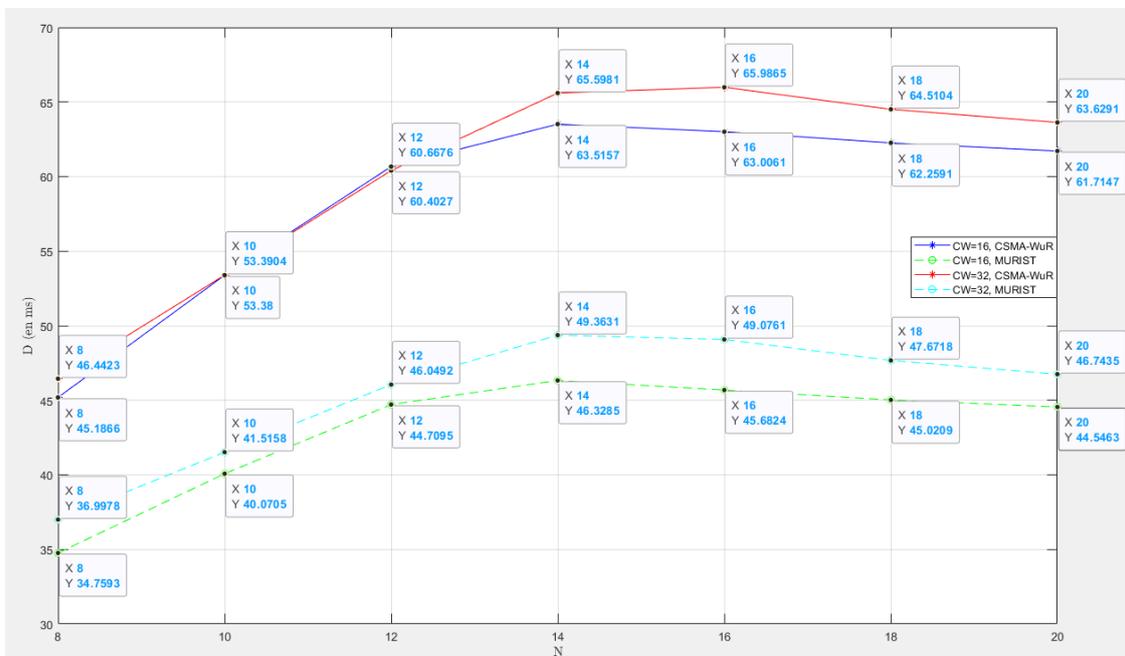


Figura 9: Comparación Retardo cuando  $M=16$ ,  $N = 2n + 2$  para  $n \geq 3$  y  $n \leq 9$ ,  $CW = \{16, 32\}$

(Fuente: Autor)

En comparación con CSMA-WuR, cuando  $CW = 16$ , el retraso de transferencia de datos de MURIS se reduce en un promedio de 18,36%. Se observó una tendencia similar para  $CW = 32$ . La razón de este comportamiento es que el protocolo MURIS está diseñado para requerir menos intentos por transmisión de paquete exitosa.

En particular, todos los dispositivos en MURIST se activan al mismo tiempo, y tan pronto como ven la transmisión de otro dispositivo en cada ciclo BO, el dispositivo vuelve al modo de suspensión ligero. Por otro lado, un dispositivo en CSMA-WuR debe esperar hasta que su contador BO llegue a cero antes de que pueda realizar CCA y volver a dormir. También es evidente en la figura 4 que cuanto mayor sea la configuración de  $CW$ , mayor será el tiempo de transferencia de datos. En las figuras 5, 7 y 11 el mayor retraso observado se debe al mayor número de intervalos BO con tamaños  $CW$  más grandes. Además, en las figuras 4, 6 y 8 ilustramos el consumo medio de energía; tanto para  $CW=16$  como para  $CW=32$ , el consumo de energía de MURIST es ligeramente menor que el de CSMA-WuR

Esta mejora significativa se debe a la función MURIST, que permite que los dispositivos vuelvan inmediatamente a dormir mientras observan las transmisiones de otros dispositivos. Además, se puede observar que para todos los protocolos estudiados, el consumo de energía promedio aumenta con el tamaño de la red.

## 5.1 Contrastación de hipótesis con los resultados

### 5.1.1 Muestra

$Pob = 672; p = 0.8; Z = 1.64; er = 0.1;$

$$M = \frac{Pob(Z^2)p(1-p)}{(Pob-1)er^2 + (Z^2)p(1-p)} = 40.5003 \quad (16)$$

Donde  $Pob, p, Z, er$  son la población, riesgo de control, porcentaje de certeza y el error tolerable.

Por cuestiones de cálculo, simulación y análisis la muestra estará constituida por 42 datos.

### 5.1.2 Análisis de normalidad y comparación de medias para muestras independientes $M = 4$

Prueba de normalidad del retardo, cuando  $M = 4, CW = 16$  con los datos de la figura 5.

T1	T2
CSMA-WuR	MURIST
27,0334	22,1686
26,7219	21,848
26,5028	21,6345
26,3524	21,491
26,2235	21,3818
26,1347	21,2979
26,6870	21,2316

Tabla 29: Comparación Retarado cuando  $M=4$ , en una ventana de 16

- CSMA-WuR

Aplicando Shapiro-Wilk normality test

data:CSMA-WuR

W=0.96309, p-value=0.8448

La muestra está Normalizada

- MURIST

Aplicando Shapiro-Wilk normality test

data: MURIST

W = 0.92339, p-value = 0.4961

La muestra está NORMALIZADA

### **Comparación de medias para muestras independientes con un test t-student**

RETARDO  $M = 4$ ,  $CW = 16$  CSMA-WuR y  $M = 4$ ,  $CW = 16$  Murist a una cola  
(T1 Modelo CSMA-WuR y T2 Modelo MURIST)

$$H_0 : \mu_1 \leq \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 > \mu_2$$

$$t = 28.468, df = 11.961, p - value = 1.169e - 12$$

Se acepta la hipótesis alternativa, la media de RETARDO  $M = 4$ ,  $CW = 16$  del Modelo MURIST ( $\mu_2$ ) ES ESTRICTAMENTE MENOR que la media del Modelo CSMA-WuR ( $\mu_1$ ) a un 95% de confianza.

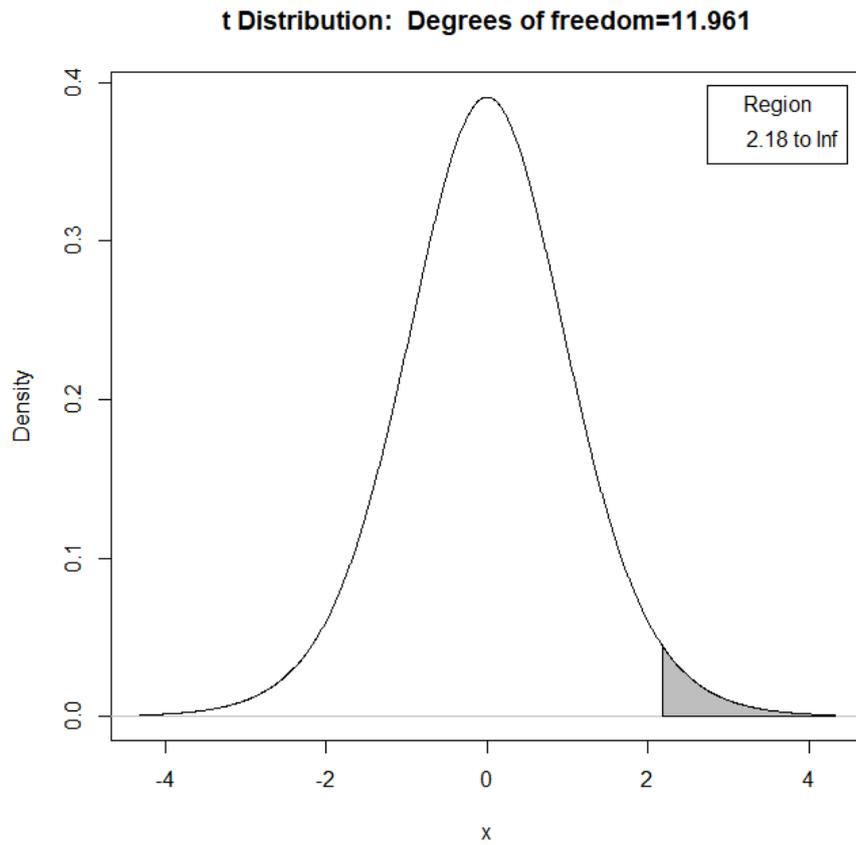


Figura 10: Distribución de Probabilidad del Retardo cuando  $M=4$  y  $CW=16$   
(Fuente: Autor)

Pruebas de normalidad de la energía, cuando  $M = 4$ ,  $CW = 16$  con los datos de la figura 4

T1	T2
CSMA	MURIST
0,6051	0,1800
0,5879	0,1750
0,5761	0,1728
0,5682	0,1695
0,5613	0,1678
0,5566	0,1665
0,5532	0,1655

Tabla 30: Comparación Energía cuando  $M = 4$ ,  $CW = 16$ .

- CSMA-WuR

Aplicando Shapiro-Wilk normality test

data:CSMA-WuR

W = 0.92618, p-value = 0.5189

La muestra está NORMALIZADA

- MURIST

Aplicando Shapiro-Wilk normality test

data: MURIST

W = 0.92933, p-value = 0.5452

La muestra está NORMALIZADA

### **Comparación de medias para muestras independientes con un test t-student**

ENERGÍA  $M = 4$   $CW = 16$  CSMA-WuR y  $M = 4$ ,  $CW = 16$  MURIST a una cola (T1 modelo CSMA-WuR y T2 modelo MURIST)

$$H_0 : \mu_1 \leq \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 > \mu_2$$

$$t = 54.929, df = 6.9351, p - value = 1.029e - 10$$

Se acepta la hipótesis alternativa, la media de ENERGÍA  $M = 4$ ,  $CW = 16$  del Modelo MURIST ( $\mu_2$ ) ES ESTRICTAMENTE MENOR que la media del Modelo CSMA ( $\mu_1$ ) a un 95% de confianza.

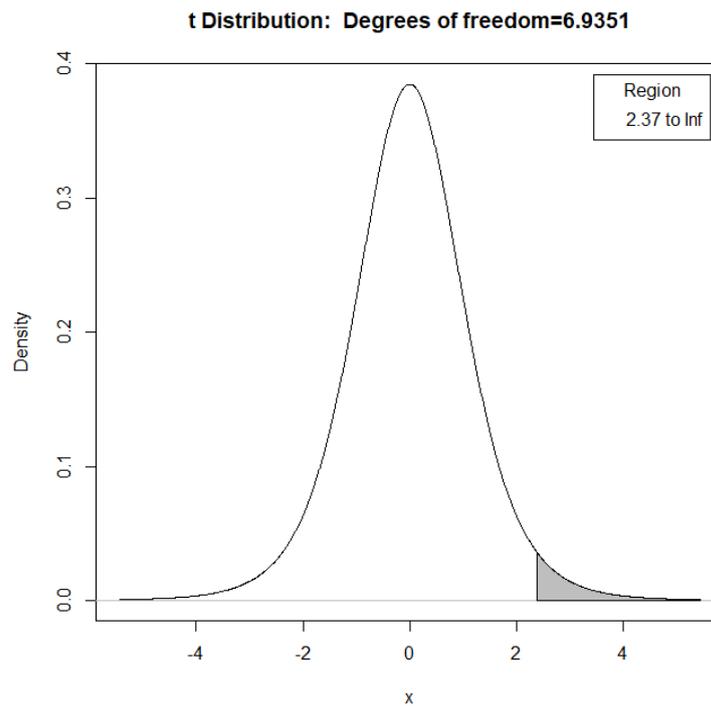


Figura 11: Distribución de Probabilidad de la Energía cuando  $M=4$  y  $CW=16$   
(Fuente: Autor)

Pruebas de normalidad del retardo, cuando  $M = 4$ ,  $CW = 32$  con los datos de la figura 5.

T1	T2
CSMA	MURIST
28,5794	23,7306
27,8753	23,0755
27,4796	22,6463
27,1882	22,343
26,9628	22,1174
26,7743	21,9432
26,6245	21,8047

Tabla 31: Comparación Retardo cuando  $M=4$ , en una ventana de 32

- CSMA-WuR

Aplicando Shapiro-Wilk normality test

data:CSMA-WuR

W = 0.93012, p-value = 0.5519

La muestra está NORMALIZADA

- MURIST

Aplicando Shapiro-Wilk normality test

data: MURIST

W = 0.92555, p-value = 0.5137

La muestra está NORMALIZADA

### **Comparación de medias para muestras independientes con un test t-student**

RETARDO  $M = 4$ ,  $CW = 32$  CSMA-WuR y  $M = 4$ ,  $CW = 32$  MURIST a una cola (T1 Modelo CSMA-WuR y T2 Modelo MURIST)

$$H_0 : \mu_1 \leq \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 > \mu_2$$

$$t = 13.156, df = 12, p - value = 0.000000008624$$

Se acepta la hipótesis alternativa, la media de RETARDO  $M = 4$ ,  $CW = 32$  del Modelo MURIST ( $\mu_2$ ) ES ESTRICTAMENTE MENOR que la media del Modelo CSMA ( $\mu_1$ ) a un 95% de confianza.

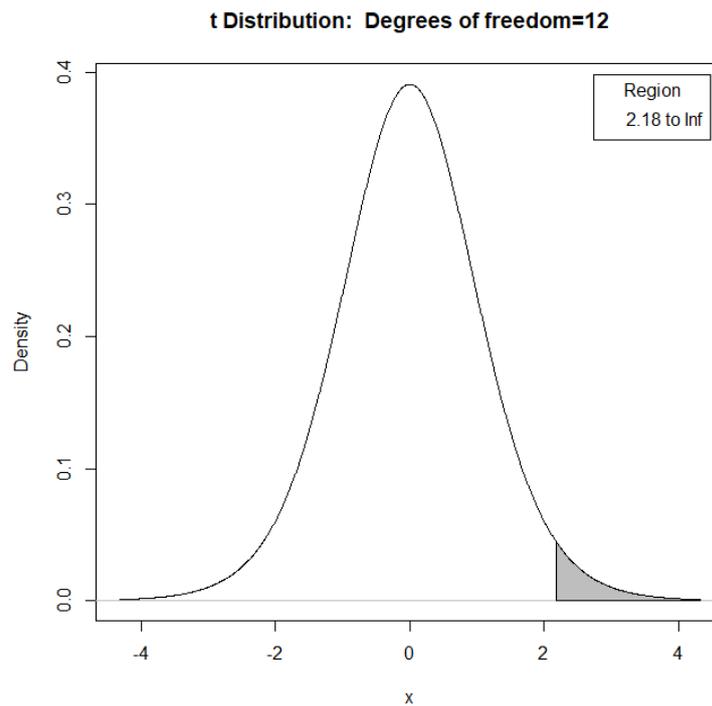


Figura 12: Distribución de Probabilidad del retardo cuando  $M=4$  y  $CW=32$   
(Fuente: Autor)

Pruebas de normalidad de la energía, cuando  $M = 4$ ,  $CW = 32$  con los datos de la figura 4.

T1	T2
CSMA	MURIST
0,627	0,2037
0,6048	0,1935
0,5897	0,1869
0,5795	0,1822
0,5709	0,1787
0,565	0,176
0,5605	0,1738

Tabla 32: Comparación de consumo de energía cuando  $M = 4$ , en una ventana  $CW = 32$

- CSMA-WuR

Aplicando Shapiro-Wilk normality test

data:CSMA-WuR

W = 0.9255, p-value = 0.5133

La muestra está NORMALIZADA

- MURIST

Aplicando Shapiro-Wilk normality test

data: MURIST

W = 0.92648, p-value = 0.5214

La muestra está NORMALIZADA.

### **Comparación de medias para muestras independientes con un test t-student**

ENERGÍA  $M = 4$ ,  $CW = 32$  CSMA-WuR y  $M = 4$ ,  $CW = 32$  MURIST a una cola (T1 modelo CSMA-WuR y T2 modelo MURIST)

$$H_0 : \mu_1 \leq \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 > \mu_2$$

$$t = 40.591, df = 8.302, p - value = 3.823e - 11$$

Se acepta la hipótesis alternativa, la media de ENERGÍA  $M = 4$ ,  $CW = 32$  del modelo MURIST ( $\mu_2$ ) ES ESTRICTAMENTE MENOR que la media del modelo CSMA ( $\mu_1$ ) a un 95% de confianza.

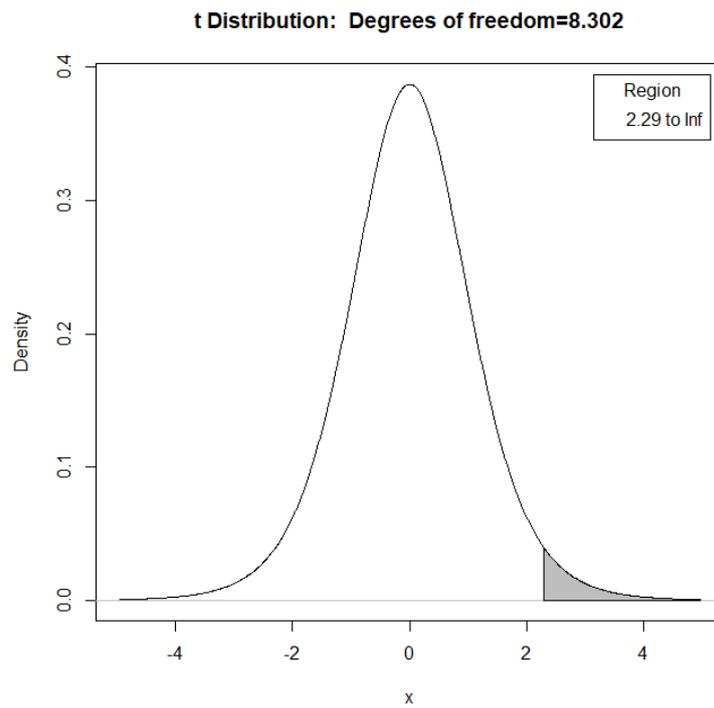


Figura 13: Distribución de Probabilidad de la energía cuando  $M=4$  y  $CW=32$   
(Fuente: Autor)

**Nota:** Este análisis se cumple también para  $M=10$  y  $M= 16$

# Capítulo VI

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

- El modelo de simulación desarrollado permitió evaluar una red de dispositivos de Internet de las cosas (IoT) que utilizan la tecnología wake-up radio (WuR). La operación de los dispositivos en la capa MAC estuvo basada en el algoritmo MURIST con el objetivo de lograr una transmisión con una fiabilidad de al menos el 95%.
- La evaluación del desempeño de la red consistió en varios procesos repetitivos en los que fueron considerados dispositivos IoT, en calidad de nodos, en un rango de 4 a 20. Se probaron diferentes tamaños de ventanas de contención  $CW$ , en un rango de 1 a 32. Por cada iteración se realizaron entre 4 y 50 intentos, hasta alcanzar una transmisión exitosa, en el menor tiempo y con el menor número de recursos. Por ejemplo, en una red IoT con 4 nodos se alcanza una probabilidad mayor o igual al 95% de confiabilidad utilizando 4 intentos y una  $CW = 22$ ; en tanto que para una

red de 20 nodos se alcanza el mismo margen de confiabilidad con 24 intentos y una  $CW = 29$ .

- A partir de los resultados obtenidos se pudo verificar que la probabilidad de transmisiones exitosas con la tecnología propuesta está en dependencia del número de dispositivos de la red y del tamaño de  $CW$ ; en consecuencia, mientras crece el número de nodos la probabilidad de una transmisión confiable decae. La explicación de la disminución del desempeño de la red se debe a que al estar los dispositivos compitiendo por el acceso al medio se producen más colisiones, por lo que es necesario ampliar el tamaño de la ventana de contención que permita seleccionar ranuras para las transmisiones de cada nodo.
- Para la medición del retardo en el acceso reconfiguramos el número de intentos  $M$ , incrementando su valor, lo que permitió un aumento significativo de la probabilidad de transmisión exitosa, llegando cerca al 100% de confiabilidad. En términos generales podemos concluir que el valor de  $M$  debe ser mayor o igual al número de nodos para asegurar la menor latencia en la red. Mientras que para obtener el retardo fueron evaluados los valores mínimos de los intentos. La transmisión exitosa está por tanto determinada por la medición de la confiabilidad; y, mientras es mayor, existirá en la práctica menor demora en la entrega de la información entre los nodos de la red IoT.
- La medición del consumo de energía es un proceso complementario para determinar la efectividad de la comunicación, debido a que las redes IoT deben guardar la característica de bajo consumo. El consumo de energía depende del número de nodos de la red y del número de intentos por transmitir, mientras crecen los intentos existe mayor consumo de energía y viceversa. Por otro lado, redes grandes con pocos intentos experimentan mayor pérdida de paquetes.
- Finalmente, para evaluar el desempeño del protocolo MURIST se realizó la com-

paración con el protocolo CSMA en los escenarios del modelo de simulación, encontrando que el retardo de transferencia a través de MURIST se reduce en un 18.36% con respecto a CSMA; se comprobó que el protocolo MURIST está diseñado para requerir menos intentos para alcanzar una transmisión exitosa, resultados con respecto a una  $CW = \{16, 32\}$ . También se comprobó que todos los dispositivos MURIST se activan al mismo tiempo y tan pronto como ven la transmisión de otro dispositivo, vuelven al modo de sueño ligero o suspensión ligera.

- La prueba de hipótesis fue realizada por medio del test t-student y el test de normalidad Shapiro-Wilk, aplicado a cada escenario del modelo de simulación, los valores encontrados permitieron aceptar la hipótesis de investigación, que determina que la media de retardo del modelo MURIST es estrictamente menor que la media de retardo de un modelo CSMA-WuR con un 95% de confianza.

## 6.2 Recomendaciones

- Las comunicaciones IoT deben asegurar transmisiones exitosas, con menor consumo de energía y menor retardo; por lo tanto, las redes de sensores deben aplicar tecnología operando en el nivel de acceso al medio basada en el protocolo MURIST en lugar del protocolo CSMA.
- Se recomienda continuar investigando sobre comunicaciones fables en IoT dada su alta expansión a nivel industrial, productivo y doméstico; tecnologías que con seguridad incrementarán su relevancia en el corto y mediano plazo.

# REFERENCIAS

- [1] ADELANTADO, F., VILAJOSANA, X., TUSET-PEIRO, P., MARTINEZ, B., MELIA-SEGUI, J., AND WATTEYNE, T. Understanding the limits of lorawan. *IEEE Communications magazine* 55, 9 (2017), 34–40.
- [2] ARANDA, J., MENDEZ, D., AND CARRILLO, H. Multimodal wireless sensor networks for monitoring applications: A review. *Journal of Circuits, Systems and Computers* 29, 02 (2020), 2030003.
- [3] ARCIA PLUA, A. A. Análisis de tráfico de datos en la capa de enlace de redes lan, para la detección de posibles ataque o intrusiones sobre tecnologías ethernet y wifi 802.11 en la carrera de ingeniería en sistemas computacionales de la universidad estatal del sur de manabí. B.S. thesis, Jipijapa. UNESUM, 2021.
- [4] CIEZA CELIS, J. A., AND OJEDA ROMERO, A. J. Evaluación del desempeño de protocolos de seguridad para combatir ataques en redes inalámbricas wi-fi.
- [5] ELGANI, A., MAGNO, M., RENZINI, F., PERILLI, L., SCARSELLI, E. F., GNUDI, A., CANEGALLO, R., RICOTTI, G., AND BENINI, L. Nanowatt wake-up radios: Discrete-components and integrated architectures. In *2018 25th IEEE international conference on electronics, circuits and systems (ICECS)* (2018), IEEE, pp. 793–796.
- [6] EVTODIEVA, T., CHERNOVA, D., IVANOVA, N., AND PROTSENKO, O. Business

analytics of supply chains in the digital economy. In *Digital Transformation of the Economy: Challenges, Trends and New Opportunities*. Springer, 2020, pp. 329–336.

- [7] FROYTLOG, A., FOSS, T., BAKKER, O., JEVNE, G., HAGLUND, M. A., LI, F. Y., OLLER, J., AND LI, G. Y. Ultra-low power wake-up radio for 5g iot. *IEEE Communications Magazine* 57, 3 (2019), 111–117.
- [8] GHOSE, D., FRØYTLOG, A., AND LI, F. Y. Enabling early sleeping and early data transmission in wake-up radio-enabled iot networks. *Computer Networks* 153 (2019), 132–144.
- [9] GHOSE, D., TELLO-OQUENDO, L., PLA, V., AND LI, F. Y. On the behavior of synchronous data transmission in wur enabled iot networks: Protocol and absorbing markov chain based modeling. *IEEE Transactions on Wireless Communications* (2022).
- [10] GOSWAMI, P., YAN, Z., MUKHERJEE, A., YANG, L., ROUTRAY, S., AND PALAI, G. An energy efficient clustering using firefly and hml for optical wireless sensor network. *Optik* 182 (2019), 181–185.
- [11] HSU, C.-A., TSAI, C.-H., LI, F. Y., CHEN, C., AND TSENG, Y.-C. Receiver-initiated data collection in wake-up radio enabled miot networks: Achieving collision-free transmissions by hashing and partitioning. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking* 5, 2 (2021), 868–883.
- [12] KEERTHIKA, M., AND SHANMUGAPRIYA, D. Wireless sensor networks: Active and passive attacks-vulnerabilities and countermeasures. *Global Transitions Proceedings* 2, 2 (2021), 362–367.
- [13] LAVERDE MENA, J. A., AND LAVERDE MENA, C. G. Internet de las cosas aplicado en la agricultura ecuatoriana: Una propuesta para sistemas de riego.

*Dilemas contemporáneos: educación, política y valores* 8, 2 (2021).

- [14] MAGNO, M., JELICIC, V., SRBINOVSKI, B., BILAS, V., POPOVICI, E., AND BENINI, L. Design, implementation, and performance evaluation of a flexible low-latency nanowatt wake-up radio receiver. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 12, 2 (2016), 633–644.
- [15] MUÑIZ FIGUEROA, R. A. Estudio de una red de cableado estructurado basados en el estándar ieee 802.3 para fortalecer la comunicación de datos en el laboratorio de hardware de la carrera de ingeniería en computación y redes. B.S. thesis, Jipijapa. UNESUM, 2021.
- [16] O’MAHONY, G. D., CURRAN, J. T., HARRIS, P. J., AND MURPHY, C. C. Interference and intrusion in wireless sensor networks. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 35, 2 (2020), 4–16.
- [17] ORDAZ-GARCÍA, O. O., ORTIZ-LÓPEZ, M., QUILES-LATORRE, F. J., OLAGUE, J. G. A., AND BELLIDO-OUTEIRIÑO, F. J. Implementación del protocolo dali en fpgas de bajo consumo de energía para uso en redes inalámbricas de sensores. *Research in Computing Science* 147 (2018), 253–263.
- [18] OYAGUE BAJAÑA, E. S. Comunicaciones m2m en trenes de alta velocidad: Aplicación de métodos adaptativos al canal de acceso aleatorio de lte-a.
- [19] SAILAJA, D., AND BENAKOP, P. G. Energy efficient mac protocol with wake up radio for wireless sensor network. In *2020 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)* (2020), IEEE, pp. 852–858.
- [20] SAMPAYO, S. L., MONTAVONT, J., PRÉGALDINY, F., AND NOËL, T. Is wake-up radio the ultimate solution to the latency-energy tradeoff in multi-hop wireless sensor networks? In *2018 14th international conference on wireless and mobile*

*computing, networking and communications (WiMob)* (2018), IEEE, pp. 1–8.

- [21] YOMO, H., ASADA, A., AND MIYATAKE, M. On-demand data gathering with a drone-based mobile sink in wireless sensor networks exploiting wake-up receivers. *IEICE Transactions on Communications* 101, 10 (2018), 2094–2103.

# **Anexos**