



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
CARRERA TELECOMUNICACIONES**

**ANÁLISIS DEL NÚMERO DE TRANSMISIONES DE PREÁMBULO  
NECESARIO PARA INCREMENTAR LA PROBABILIDAD DE ACCESO  
SATISFACTORIO EN DESPLIEGUES DE COMUNICACIÓN MASIVA  
IOT CELULAR**

**Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero en Telecomunicaciones**

**Autor:**

**Sánchez Cullay Marco Vinicio**

**Tutor:**

**PhD. Luis Patricio Tello Oquendo**

**Riobamba, Ecuador. 2023**

## DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, Marco Vinicio Sánchez Cullay, con cédula de ciudadanía 0605559897, autor (a) (s) del trabajo de investigación titulado: ANÁLISIS DEL NÚMERO DE TRANSMISIONES DE PREÁMBULO NECESARIO PARA INCREMENTAR LA PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO EN DESPLIEGUES DE COMUNICACIÓN MASIVA IOT CELULAR, 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 (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 15 de diciembre de 2023.



---

Marco Vinicio Sánchez Cullay,  
C.I:0605559897

## **DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR**

Quien suscribe, Luis Patricio Tello Oquendo catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: ANÁLISIS DEL NÚMERO DE TRANSMISIONES DE PREÁMBULO NECESARIO PARA INCREMENTAR LA PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO EN DESPLIEGUES DE COMUNICACIÓN MASIVA IOT CELULAR, bajo la autoría de Marco Vinicio Sanchez Cullay; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 24 días del mes de noviembre de 2023



LUIS PATRICIO TELLO  
OQUENDO

---

PhD. Luis Patricio Tello Oquendo

C.I: 0604235242

## CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **ANÁLISIS DEL NÚMERO DE TRANSMISIONES DE PREÁMBULO NECESARIO PARA INCREMENTAR LA PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO EN DESPLIEGUES DE COMUNICACIÓN MASIVA IOT CELULAR**, presentado por **Marco Sánchez** con cédula de identidad número 060555989-7, bajo la tutoría de PhD. 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 el 15 de diciembre de 2023

Mgs. Klever Hernán Torres Rodríguez  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO**



---

Mgs. José Luis Jinez Tapia  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**



---

Mgs. Deysi Vilma Inca Balseca  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**



---

# CERTIFICACIÓN

Que, **Marco Vinicio Sanchez Cullay** con CC: **0605559897**, estudiante de la Carrera **Ingeniería en Telecomunicaciones**, Facultad de **Ingeniería**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**ANÁLISIS DEL NÚMERO DE TRANSMISIONES DE PREÁMBULO NECESARIO PARA INCREMENTAR LA PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO EN DESPLIEGUES DE COMUNICACIÓN MASIVA IOT CELULAR**", cumple con el **11%**, 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, 08 diciembre del 2023



**LUIS PATRICIO TELLO**  
**OQUENDO**

---

PhD. Luis Patricio Tello Oquendo  
**TUTOR**

## DEDICATORIA

*Dedico este trabajo a mis padres, cuyo amor incondicional, sacrificio y constante apoyo han sido la fuerza impulsora detrás de cada logro en mi vida. Su dedicación y valores han sido mi inspiración y guía a lo largo de esta travesía académica.*

*A mi hermana, cuya presencia y aliento han sido un faro de luz en los días oscuros. Su apoyo incondicional y positivismo han sido un regalo invaluable.*

*A mi tutor, agradezco su paciencia, sabiduría y orientación durante todo este proceso. Su tutoría ha sido esencial para mi crecimiento académico y profesional.*

*A mi familia extendida y amigos cercanos, quienes han sido testigos de mis desafíos y triunfos, les dedico este trabajo. Su aliento constante y palabras de aliento han sido un bálsamo en los momentos difíciles.*

*Este logro no representa únicamente mi propio esfuerzo, sino que también refleja la contribución de todos aquellos que han compartido el trayecto de mi travesía académica. Gracias por su confianza, amor y apoyo inquebrantable.*

**Marco Sánchez C.**

## AGRADECIMIENTO

*En el desarrollo de mi tesis, deseo expresar mi profundo agradecimiento al autor de la vida, nuestro Señor Dios, por ser mi guía constante a lo largo de mi carrera profesional y por permitirme vivir este sueño tan anhelado junto a mi amada familia.*

*Agradezco de manera especial a mi familia, quienes han sido incondicionales en todo momento, brindándome amor, esfuerzo, apoyo y palabras de fortaleza en los momentos más difíciles. Son el vivo reflejo de superación, valentía y unión familiar, y les estoy eternamente agradecido.*

*Mi más sincero agradecimiento al PhD. Luis Patricio Tello O., mi estimado tutor, por creer en mí y proporcionarme orientación, asesoría, apoyo y el espacio necesario para desarrollar el proyecto de investigación con calidad y eficacia.*

*También quiero expresar mi gratitud a los docentes que impartieron sus valiosos conocimientos y experiencias durante mi formación profesional. Su dedicación, apoyo, paciencia e interés han contribuido significativamente a mi formación académica.*

*Agradezco a mis amigos y compañeros, quienes han sido parte fundamental de mi trayectoria universitaria. Compartir experiencias únicas con ustedes ha dejado huellas imborrables en mi mente y corazón.*

*Cada uno de ustedes ha dejado una marca imborrable en mi camino académico y personal, y por eso les estoy agradecido de corazón.*

**Marco Sánchez C.**

## ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICACIÓN ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESUMEN

ABSTRACT

<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>16</b>
1.1    Introducción.....	16
1.2    Planteamiento del Problema .....	17
1.3    Objetivos.....	18
1.3.1    General.....	18
1.3.2    Específicos .....	18
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>19</b>
1.4    Marco Teórico.....	19
1.4.1    Internet de las cosas celular (CIoT).....	19
1.4.2    Procedimiento de acceso aleatorio .....	23
1.4.3    Colisión del preámbulo y problemas de sobrecarga.....	23
1.4.4    Procedimiento de Backoff.....	25
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>26</b>
1.5    Metodología.....	26
1.5.1    Tipo de investigación.....	26
1.5.2    Diseño de investigación .....	26



1.5.3	Técnicas de recolección de datos, .....	27
1.5.4	Población de estudio y tamaño de muestra, .....	27
1.5.4.1	Población.....	27
1.5.4.2	Muestra .....	27
1.5.5	Operacionalización de las variables .....	28
1.6	Procedimiento .....	28
1.6.1	Métodos de análisis y procesamiento de datos.....	28
1.6.2	Diagrama secuencial del procedimiento de acceso aleatorio .....	30
1.6.2.1	Msg1: Transmisión de Preámbulo .....	31
1.6.2.2	Msg2: Respuesta de acceso aleatorio.....	32
1.6.2.3	Msg3: Solicitud de conexión .....	32
1.6.2.4	Msg4: Resolución de Contención .....	33
1.6.3	Escenarios de colisión .....	33
1.6.4	Métricas de rendimiento.....	36
1.6.4.1	Probabilidad de acceso satisfactorio .....	36
1.6.4.2	Numero promedio de transmisiones de preámbulo .....	36
1.6.5	Métricas para QoS (Calidad de servicio) .....	37
1.6.5.1	Cobertura.....	38
1.6.5.2	Latencia.....	38
1.6.5.3	Duración de batería .....	40
<b>CAPÍTULO IV.....</b>		<b>41</b>
1.7	Resultados y discusión.....	41
1.7.1	Resultados de probabilidad de acceso satisfactorio en función de diversas cargas de tráfico. ....	41
1.7.2	Resultados de número promedio de transmisiones de preámbulo para los accesos exitosos en función de diversas cargas de tráfico .....	49
1.7.3	Probabilidad de acceso satisfactorio en función del número máximo de transmisiones de preámbulo.....	52

1.7.4 Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio en función de calidad de servicio.....	55
1.7.5 Resultados del número máximo de transmisiones de preámbulo en función a la calidad de servicio.....	57
<b>CAPITULO V .....</b>	<b>69</b>
1.8 Conclusiones.....	69
1.9 Recomendaciones .....	70
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>74</b>

## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1 Variables dependientes e independientes .....	28
Tabla 2 Probabilidad de acceso satisfactorio (Ps) para diferentes valores de número máximo de intentos de transmisión del preámbulo(rmax) en rmax = 2, rmax = 4, rmax=6, rmax=8 y rmax = 10.....	42
Tabla 3 Número promedio de transmisiones de preámbulo para diferentes valores de número máximo de intentos de transmisión del preámbulo en rmax = 2, rmax = 3, rmax = 4, rmax = 5, rmax=6, rmax =7, rmax=8, rmax = 9, y rmax = 10.....	49
Tabla 4 Tabla de ANOVA con resultados de las mediciones de Probabilidad de acceso satisfactorio.....	62
Tabla 5 Tabla de correlación de transmisiones de preámbulo de valores de 4 y 5 .....	63
Tabla 6 Prueba de Tukey con un valor de transmisión de preámbulo de 4.....	66
Tabla 7 Prueba de Tukey con un valor de transmisión de preámbulo de 5 .....	67

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Modelo IoT.....	21
Figura 2 Retos de comunicación masiva IoT celular .....	22
Figura 3 Influencias del proceso de acceso aleatorio .....	23
Figura 4 Procedimiento y análisis .....	29
Figura 5 Procedimiento de Acceso Aleatorio RA .....	31
Figura 6 Evento de colisión en el mensaje 1 .....	34
Figura 7 Evento de colisión en mensaje 3 .....	35
Figura 8 Elementos que afectan la respuesta en IoT .....	39
Figura 9 Probabilidad de acceso satisfactorio para diferentes valores de número máximo de intentos de transmisión del preámbulo( $r_{max}$ ) en $r_{max} = 2$ , $r_{max} = 3$ , $r_{max} = 4$ , $r_{max} = 5$ , $r_{max}=6$ , $r_{max} =7$ , $r_{max}=8$ , $r_{max} = 9$ , y $r_{max} = 10$ .....	42
Figura 10 Número promedio de transmisiones de preámbulo para diferentes valores de número máximo de intentos de transmisión del preámbulo en $r_{max} = 2$ , $r_{max} = 3$ , $r_{max} = 4$ , $r_{max} = 5$ , $r_{max}=6$ , $r_{max} =7$ , $r_{max}=8$ , $r_{max} = 9$ , y $r_{max} = 10$ .....	50
Figura 11 Probabilidad de Acceso Satisfactorio en función del número máximo de transmisión de preámbulos.....	53
Figura 12 Promedio de Transmisiones de Preámbulo en función de del número máximo de transmisión de preámbulos.....	54
Figura 13 Número Medio de Transmisiones de Preámbulo en función de la cantidad de Usuarios con QoS de $P_s \geq 0.90$ .....	55
Figura 14 Número Medio de Transmisiones de Preámbulo en función de QoS de $P_s \geq 0.80$ .....	56
Figura 15 Número máximo de transmisiones de preámbulos en función de la cantidad de Usuarios con QoS de $P_s \geq 0.90$ .....	58

Figura 16 Número máximo de transmisiones de preámbulos en función de la cantidad de Usuarios con QoS de $P_s \geq 0.80$ .....	59
Figura 17 Probabilidad de acceso satisfactorio que alcanza su punto más alto .....	60
Figura 18 Grafico de medias de transmisión de preámbulos.....	63
Figura 19 Correlación de transmisiones de preámbulo de valores de 4 y 5. ....	64
Figura 20 Diagrama de cajas de transmisiones de preámbulos .....	65
Figura 21 Media de probabilidad de acceso satisfactorio para un valor de transmisión de preámbulo de 4 .....	66
Figura 22 Media de probabilidad de acceso satisfactorio para un valor de transmisión de preámbulo de 4 .....	68

## RESUMEN

En el desafiante escenario de las comunicaciones masivas IoT celular, donde la conectividad desempeña un papel importante, se exploran estrategias para mejorar la probabilidad de acceso de manera eficiente, contribuyendo así a una conectividad más robusta y efectiva en este entorno dinámico. Este estudio se centra en el análisis del número de transmisiones de preámbulos necesarios para incrementar la probabilidad de acceso satisfactorio. En este contexto, se investiga la manera de ajustar y encontrar estratégicamente el número de transmisiones de preámbulos para potenciar la eficiencia del acceso en entornos con múltiples dispositivos IoT. Mediante el uso de simulaciones en MATLAB, se realizaron múltiples escenarios de prueba variando la carga de tráfico desde condiciones de tráfico moderadas hasta situaciones de congestión intensa, durante este proceso se evaluó la probabilidad de acceso satisfactorio en función del número de transmisiones de preámbulo.

Se examinó diversas configuraciones y parámetros, con especial atención al número de transmisiones de preámbulos, con el objetivo de identificar cómo este factor impacta la probabilidad de acceso satisfactorio. Los resultados obtenidos revelaron que existe una cantidad óptima de transmisiones de preámbulo que maximiza la probabilidad de acceso satisfactorio en despliegue de comunicaciones masivas IoT celular.

Los resultados y conclusiones obtenidos a través de este análisis proporcionan una visión integral sobre las estrategias óptimas para incrementar la probabilidad de acceso satisfactorio en despliegues de comunicaciones masivas IoT, contribuyendo así al avance y optimización de la conectividad en entornos IoT de gran escala.

**Palabras clave:** Internet de las cosas, comunicaciones masivas, probabilidad de acceso, transmisiones de preámbulos.

## ABSTRACT

In the challenging scenario of cellular IoT massive communications, where connectivity plays a crucial role, strategies are being explored to enhance the probability of access efficiently, thereby contributing to a more robust and effective connectivity in this dynamic environment. This study analyzes the number of preamble transmissions necessary to increase the probability of successful access. In this context, how to strategically adjust and determine the number of preamble transmissions to enhance access efficiency in environments with multiple IoT devices is investigated. Through the use of simulations in MATLAB, multiple test scenarios were conducted, varying traffic load from moderate traffic conditions to intense congestion situations. During this process, the probability of successful access was evaluated based on the number of preamble transmissions.

Various configurations and parameters were examined, with particular attention to the number of preamble transmissions, aiming to identify how this factor impacts the probability of successful access. The results revealed that an optimal number of preamble transmissions exists that maximizes the probability of successful access in deploying massive cellular IoT communications.

The results and conclusions derived from this analysis provide comprehensive insight into optimal strategies for increasing the probability of successful access in massive cellular IoT communications deployments, thus contributing to the advancement and optimization of connectivity in large-scale IoT environments.

**Keywords:** Internet of Things, massive communications, access probability, preamble transmissions.



Escaneado y certificado digitalmente por:  
DARIO JAVIER  
CUTIOPALA LEON

Reviewed by:  
Mg. Dario Javier Cutiopala Leon  
**ENGLISH PROFESSOR**  
c.c. 0604581066

## CAPÍTULO I.

### 1.1 Introducción.

Con los continuos avances en tecnología como una innovación potencial, el internet de las cosas (IoT) está tomando el camino que está floreciendo como una red informática global ubicua donde todos y todo estará conectado a Internet [1]. IoT evoluciona continuamente y es un tema de investigación candente donde las oportunidades son infinitas. Las imaginaciones son ilimitadas y lo han puesto a punto de remodelar la forma actual de Internet en una versión modificada e integrada. La cantidad de dispositivos que utilizan los servicios de Internet aumenta cada día y tener todos ellos conectados por cable o de forma inalámbrica pondrá una poderosa fuente de información al alcance de la mano.

El concepto de permitir la interacción entre máquinas inteligentes es una tecnología de vanguardia, pero las tecnologías que componen el IoT no son algo nuevo para nosotros. IoT, como puede adivinarse por su nombre, es el enfoque de convergencia de datos obtenidos de diferentes tipos de cosas a cualquier plataforma virtual en la infraestructura de Internet existente [2].

Uno de los temas claves dentro del futuro de IoT es el término massive IoT (mIoT) o Internet de las cosas masivo con necesidades como dispositivos de bajo costo [3], bajo consumo de energía, alta densidad y cobertura profunda.

El Internet masivo de las cosas ha brindado una oportunidad propicia para construir conexiones poderosas y ubicuas que enfrentan una multitud de nuevos desafíos, donde las redes celulares son soluciones potenciales debido a su alta escalabilidad, confiabilidad y eficiencia [4]. Sin embargo, la eficacia de esta comunicación se ve desafiada por diversos factores, entre los cuales se destaca la necesidad de realizar transmisiones de preámbulo para establecer conexiones satisfactorias. La optimización de este proceso es crucial para mejorar la probabilidad de acceso satisfactorio en entornos de despliegue masivo.

Cada año se incrementa el número de dispositivos IoT, según el reporte de [5] se informa que en los últimos dos años hubo un aumento del 66% y se prevé llegar a una media de 15 objetos conectados por persona en 2030. En la búsqueda constante de mejorar la eficiencia de las comunicaciones, se hace necesario analizar detenidamente los mecanismos que rigen



el acceso a la red, especialmente en entornos con una creciente de dispositivos IoT. En este contexto, se plantea la necesidad de simular un mecanismo que posibilite la evaluación de una cierta cantidad de transmisiones de preámbulos, con el propósito de identificar un punto óptimo que maximice la probabilidad de acceso satisfactorio para un conjunto específico de dispositivos IoT.

## **1.2 Planteamiento del Problema**

En la actualidad, la tecnología mIot se está apropiando del mercado y al existir tantos dispositivos interactuando en una red, el canal de transmisión crea un problema de sobrecarga, lo cual reduce de forma significativa el rendimiento de un sistema. A medida que el número de dispositivos IoT aumenta, la posibilidad de colisiones durante el proceso de acceso aleatorio también se incrementa. Esto puede dar lugar a una saturación del canal, interferencias y, como consecuencia, a una disminución en la eficiencia global de la red.

El número de transmisiones de preámbulo está directamente vinculado a la eficiencia del acceso en redes masivas de IoT. La cantidad de transmisiones de preámbulo puede tener un impacto significativo en la velocidad y eficiencia de acceso a la red mejorando la capacidad de los dispositivos para transmitir datos y recibir instrucciones.

Para mitigar esta problemática actual, se pretende analizar el número máximo de transmisión de preámbulos necesarios para encontrar un punto de equilibrio adecuado, con el fin de incrementar la probabilidad de acceso satisfactorio en despliegues de comunicaciones mIoT.

Mediante herramientas de cálculo numérico como MATLAB, se realizará una simulación del número máximo de transmisión de preámbulos para redes mIoT y se evaluará su capacidad para soportar comunicaciones masivas mediante pruebas de tráfico.

Finalmente, el análisis de métricas clave de rendimiento como la probabilidad de acceso satisfactorio y el número promedio de transmisiones de preámbulo, permitirá evaluar el efecto que tiene el mecanismo en el rendimiento de la red, evitando así colisiones y sobrecargas, lo que implicaría mejorar el rendimiento.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 General**

- Analizar el número de transmisión de preámbulos necesario para incrementar la probabilidad de acceso satisfactorio en despliegues de comunicaciones masivas en Internet de las cosas.

### **1.3.2 Específicos**

- Definir la probabilidad de acceso satisfactorio como métrica de análisis
- Diseñar un modelo de simulación que permita evaluar el número máximo de transmisión de preámbulos para redes celulares mIoT.
- Evaluar el número de transmisiones de preámbulo necesario para incrementar la probabilidad de acceso satisfactorio con diferentes cargas de tráfico en mIoT.

## CAPÍTULO II

### 1.4 Marco Teórico

#### 1.4.1 Internet de las cosas celular (CIoT)

IoT celular es una tecnología que permite que los dispositivos IoT se conecten a Internet utilizando la misma infraestructura de red de los teléfonos móviles inteligentes, eliminando la necesidad de invertir y desarrollar una infraestructura de red dedicada solo para dispositivos IoT[6].

El aumento de las recientes modalidades de conectividad ha posibilitado que el Internet de las Cosas basada en redes celulares se convierta en una alternativa significativa para despliegues a gran escala de IoT, aprovechando la extensa cobertura de las redes celulares ya establecidas [7].

**Entre los beneficios principales que brindan el CIoT están:**

#### **Cobertura extensiva**

Debido a que CIoT utilizan las redes celulares existentes, los dispositivos de IoT tienen garantizada una amplia cobertura de acceso a datos en varias ciudades o regiones.

#### **Ahorro de costos**

Los requisitos de infraestructura para CIoT, como torres celulares y estaciones base, ya están establecidos gracias a las importantes inversiones en las redes celulares existentes. Además, IoT celular puede conectar miles de dispositivos IoT en cada kilómetro cuadrado.

#### **Gestión remota**

Con una plataforma IoT en línea, puede administrar y solucionar problemas de forma centralizada de sus dispositivos conectados de forma remota, independientemente de su ubicación. Este beneficio garantiza que los ingenieros de servicio puedan recibir alertas sobre las excepciones en lugar de tener que revisar cada dispositivo.

## **Flexibilidad en Conectividad**

No todos los dispositivos conectados a IoT son iguales, si un dispositivo conectado no utiliza la transferencia de datos en tiempo real, se puede optar por una conexión IoT celular rentable que transmite volúmenes de datos bajos.

## **Seguridad**

Los dispositivos IoT celulares son seguros, en el cual puede aplicar un cifrado adicional para garantizar un enfoque de seguridad de varias capas. Los dispositivos se pueden monitorear para identificar actividad anormal o maliciosa. Además, los dispositivos IoT celulares se pueden configurar para usar tecnologías de red privada como VPN que ofrecen seguridad mejorada[6].

## **Arquitectura IoT**

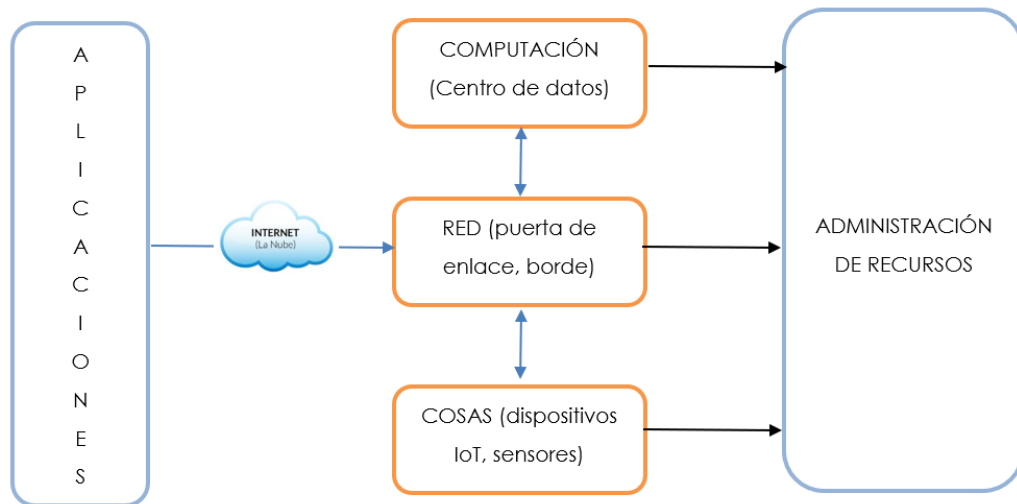
La estructura fundamental de todos los modelos de Internet de las Cosas (IoT) puede ser conceptualizada dentro de la arquitectura de tres niveles, que se compone de la Capa de Aplicación, la Capa de Red y la Capa de Percepción[8].

Esta disposición tritier (Software de seguridad pública personalizado) proporciona una organización jerárquica que facilita la comprensión y gestión eficaz de los sistemas IoT. En la Capa de Aplicación, se enfoca en la lógica y funcionalidad específicas de las aplicaciones IoT. La Capa de Red se encarga de la comunicación y la transmisión de datos entre los dispositivos conectados, mientras que la Capa de Percepción aborda la adquisición de datos a través de sensores y otros dispositivos físicos.

Desde el punto de vista sintáctico, este término se compone de dos elementos fundamentales. En primer lugar, "Internet", sugiere una perspectiva orientada a la red. En segundo lugar, "Cosas" se centra en los objetos que se deben incorporar dentro de un marco común. Sin embargo, es evidente que IoT, al ser un sistema colaborativo, engloba tres elementos esenciales: los dispositivos físicos (cosas), la comunicación y la informática. Para comprender las funcionalidades básicas de IoT, es esencial comprender el principio de funcionamiento de estos tres pilares interconectados[8].

Para abordar la incorporación de la Internet de las Cosas (IoT) como un servicio y facilitar la comprensión de las actividades fundamentales, se adoptado un modelo de tres niveles para el ecosistema IoT, ilustrado en la figura 1. En este modelo, el Nivel I se dedica a los

dispositivos IoT que están equipados con sensores, comúnmente referidos como "cosas". El Nivel II comprende elementos de red, como pasarelas o nodos de borde, que gestionan la parte de la comunicación. En cuanto al Nivel III, que se encuentra en la cima, abarca nodos de computación como los nodos en la nube, nodos de niebla, nodos de borde, entre otros. A continuación, exploraremos de manera detallada cada uno de los componentes que integran el sistema IoT[8].



*Figura 1 Modelo IoT*

*Fuente: [Autor]*

### **Cosas**

En la categoría de "cosas", se incluyen dispositivos equipados con sensores y con la capacidad de conectarse a Internet. Esto abarca desde dispositivos inteligentes y sensores hasta seres humanos, representando cualquier objeto consciente de su entorno y capaz de establecer comunicación con otras entidades en cualquier momento y lugar.

### **Comunicación**

Este componente es esencial en la red y se encuentra estratégicamente posicionado para facilitar la comunicación entre los dispositivos y su entorno externo, siguiendo los protocolos específicos para la interacción en la red. La red debe garantizar privacidad, seguridad, comunicación y capacidad computacional a la escala de implementación de la Internet de las Cosas (IoT).

## Informática

La capacidad de cómputo es esencial para realizar cálculos y análisis de los datos recolectados de los objetos. Estos servicios computacionales pueden ser proporcionados por nodos en la nube, dispositivos periféricos o nodos de niebla. La computación debe realizar decisiones inteligentes y realizar inferencias dentro de un sistema definido, constituyendo en última instancia la conexión para el uso práctico y el análisis del comportamiento del usuario[8].

## Comunicación masiva IoT

El IoT masivo se refiere al monitoreo de una gran cantidad de dispositivos y sensores, que conectan cantidades masivas de dispositivos de baja complejidad y bajo costo con una batería de larga duración y velocidades de rendimiento relativamente bajas [8]. IoT masivo tiene el potencial no solo de beneficiar los procesos existentes, sino también de cambiar la sociedad a través de la innovación [9].

La transición a IoT masivo, según [10] alcanzará los \$ 121,4 mil millones para 2026, aumentando a una tasa de crecimiento anual compuesto (CAGR) del 7,1% de 2021 a 2026, y se estima que el mercado IoT masivo experimentará un crecimiento sustancial durante el período de pronóstico principalmente debido a la creciente demanda de automatización a gran escala e inteligencia artificial. IoT masivo celular tiene la capacidad de asumir diversos retos, los principales se describen en la figura 2.



Figura 2 Retos de comunicación masiva IoT celular

Fuente: [Autor]

### 1.4.2 Procedimiento de acceso aleatorio

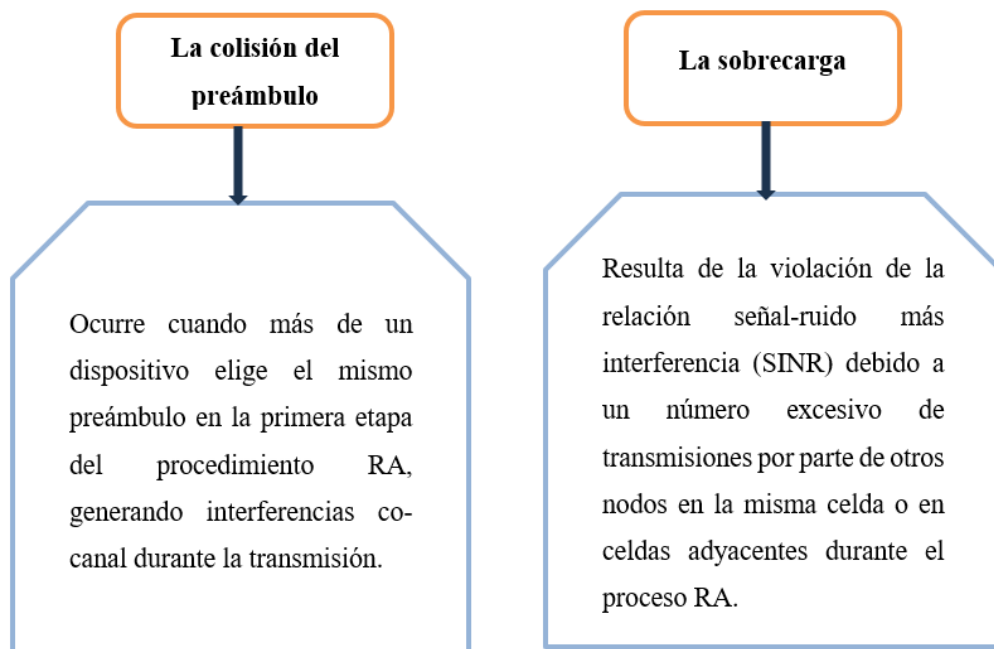
El procedimiento de acceso aleatorio (RAP) es una relación entre dispositivos IoT y una estación base. Este procedimiento está basado en un mecanismo de contención que produce una degeneración del rendimiento cuando se produce una multitud de transmisiones simultáneas[11].

Este proceso se ejecuta mediante el Canal de Acceso Aleatorio (RACH) y comprende cuatro fases: la Transmisión de Preámbulo, la Respuesta de Acceso Aleatorio (RAR), la Solicitud de Conexión y la Resolución de Contención[10].

A continuación, se describen los desafíos más notables asociados del procedimiento de acceso aleatorio convencional en el contexto del Internet de las Cosas (IoT) masivo.

### 1.4.3 Colisión del preámbulo y problemas de sobrecarga

En el proceso de acceso aleatorio, se pueden presentar dos situaciones que afectan significativamente su eficacia (Figura 3):



*Figura 3 Influencias del proceso de acceso aleatorio*

*Fuente: [Autor]*

En situaciones de colisión, los dispositivos repetirán la transmisión del preámbulo en el próximo recurso disponible para el acceso aleatorio. No obstante, las repeticiones frecuentes del preámbulo pueden ocasionar congestión en la red, aumentar los retrasos, generar pérdida de paquetes, incrementar el consumo de energía, provocar una sobrecarga excesiva en la señalización y resultar en un uso ineficiente de los recursos de la radiofrecuencia [12].

Las estrategias actuales para abordar el problema de las colisiones emplean diversas técnicas para retardar la retransmisión de preámbulos con el objetivo de minimizar la posibilidad de colisiones. Estas incluyen enfoques como la asignación dinámica, el acceso mediante ranuras, el acceso basado en grupos, el acceso basado en solicitudes y la restricción de clases de acceso. A pesar de que estas tácticas pueden disminuir las colisiones en el acceso hasta cierto punto, no son capaces de manejar eficientemente un gran número de dispositivos en escenarios de Internet de las Cosas (IoT).

Problema de sobrecarga extrema: Un desafío adicional en la comunicación centrada en la conexión del estándar LTE (Long Term Evolution) actual es la carga excesiva de señalización. Esto se produce cuando se dedican muchos recursos para establecer una conexión con el objetivo de posibilitar la transmisión de datos extremadamente pequeños, como por ejemplo unos pocos kbps, que son típicos en las comunicaciones IoT. Esta situación se agrava especialmente cuando un gran número de dispositivos IoT intentan acceder a las redes celulares simultáneamente.

Como ejemplo, para enviar 100 bytes de datos, generalmente se requerirían aproximadamente 59 bytes de sobrecarga en la dirección ascendente y 136 bytes en la dirección descendente para las transmisiones de señalización. Se proponen esquemas híbridos que combinan el procedimiento de acceso aleatorio con la transmisión de datos, donde los dispositivos envían sus mensajes a través del tercer mensaje del procedimiento RA. La agregación de datos también podría emplearse para una transmisión más eficiente, aunque solo es adecuada para aplicaciones IoT que toleran cierto retardo. Sin embargo, estas estrategias tienden a no ser escalables y a ser ineficaces cuando el número de dispositivos es muy elevado[12].



#### 1.4.4 Procedimiento de Backoff

El procedimiento de Backoff es un método de control de colisiones del RACH que se ejecuta dentro del RAP basado en contención, planteada por los estándares 3GPP en caso de que exista un fallo en el acceso a la red [13] [14]. Si el intento de acceso aleatorio de un equipo de usuario falla independientemente de la causa, el equipo de usuario tiene que volver a iniciar el procedimiento de acceso aleatorio, en este proceso el equipo espera un tiempo aleatorio  $T_{BO}$  (ms) hasta que pueda intentar una nueva transmisión de preámbulo [15], este tiempo es definido en función de la ecuación 1.

$$T_{BO} = \mathcal{U}(0, BI)$$

*Ecuación 1: Tiempo aleatorio [14]*

En donde  $\mathcal{U}$  significa distribución uniforme,  $BI$  es el indicador de Backoff definido por la BS (Estación base) y su valor oscila entre 0 y 960 ms. El valor de  $BI$  se envía en el mensaje RAR (Respuesta de acceso aleatorio), el cual es identificado por todos los dispositivos que enviaron un preámbulo RACH en un RAO anterior. Cada dispositivo que no obtuvo confirmación con el RAR es considerado como un intento fallido [14], por lo tanto se utiliza el  $BI$  para calcular el  $T_{BO}$  antes de realizar otro intento partiendo desde el primer paso [16].

Del mismo modo ocurre con los dispositivos que no reciben el mensaje de resolución de contención, calculan el  $T_{BO}$  antes de realizar otro intento para garantizar el acceso exitoso a los recursos de red [14].

## CAPÍTULO III

### 1.5 Metodología

#### 1.5.1 Tipo de investigación.

##### **Investigación exploratoria y experimental**

El presente tipo de investigación permitirá recolectar información de estudios científicos previos, examinando diversos escenarios de comunicaciones masivas IoT celular desde la perspectiva de la métrica de acceso satisfactorio.

Se desarrollará un modelo de simulación de transmisiones de preámbulos. Se obtendrán métricas de rendimiento de la red para el acceso satisfactorio bajo diferentes demandas de tráfico masivo IoT, cuyo objetivo es obtener una visión clara de las transmisiones de preámbulo e identificar sus debilidades para encontrar un punto óptico en función de la probabilidad de acceso satisfactorio. Se analizarán los resultados de varios escenarios para determinar su respectivo comportamiento, los resultados serán obtenidos por medio de indicadores cuantitativos.

#### 1.5.2 Diseño de investigación

##### **Método analítico**

El método analítico es sumamente útil en el presente proyecto de investigación, dado que emplea herramientas que revelan relaciones esenciales y características fundamentales de su objeto de estudio, y con ayuda de la observación el presente método permitirá analizar y evaluar el proceso del número de transmisiones de preámbulo.

##### **Método experimental**

Se diseñará una simulación para evaluar el número máximo de transmisión de preámbulos para redes celulares mIoT.

### **Método descriptivo**

El método descriptivo se utilizará para caracterizar el comportamiento de los parámetros determinados y obtener información precisa que permita dar soporte a la investigación.

#### **1.5.3 Técnicas de recolección de datos,**

Se utilizará la técnica de observación, permitiendo así evaluar un tema en específico con sus respectivas características de una forma sistemática y precisa. Los parámetros para considerar con respecto a los objetivos planteados en la investigación son: número de transmisiones de preámbulo y el acceso satisfactorio

#### **1.5.4 Población de estudio y tamaño de muestra,**

##### **1.5.4.1 Población**

De acuerdo con el modelo de tráfico del canal de acceso satisfactorio, la cantidad de Usuarios Equipados (UE) que intentan establecer comunicación abarca desde 1 hasta 10000, distribuidos a lo largo del tiempo con parámetros específicos para los tiempos de llegada. Estos intentos de comunicación están distribuidos en el tiempo con parámetros asociados a los tiempos de llegada. En este contexto, la población de interés para el presente proyecto de investigación se define en función de las mediciones de probabilidad de acceso satisfactorio. Esta probabilidad se define como la proporción de usuarios que lograron acceder satisfactoriamente a la red de comunicación con respecto al total de usuarios que intentaron acceder utilizando el canal de acceso aleatorio.

##### **1.5.4.2 Muestra**

La muestra seleccionada de manera aleatoria comprende todos los dispositivos que lograron acceder exitosamente a la red. A partir de esta muestra, se recopilan mediciones relativas a los parámetros esenciales para la evaluación del rendimiento de la red. Además, en el análisis se abordará la exploración de la probabilidad de acceso satisfactorio, así como el promedio de transmisiones de preámbulos.

### 1.5.5 Operacionalización de las variables

Tabla 1 Variables dependientes e independientes

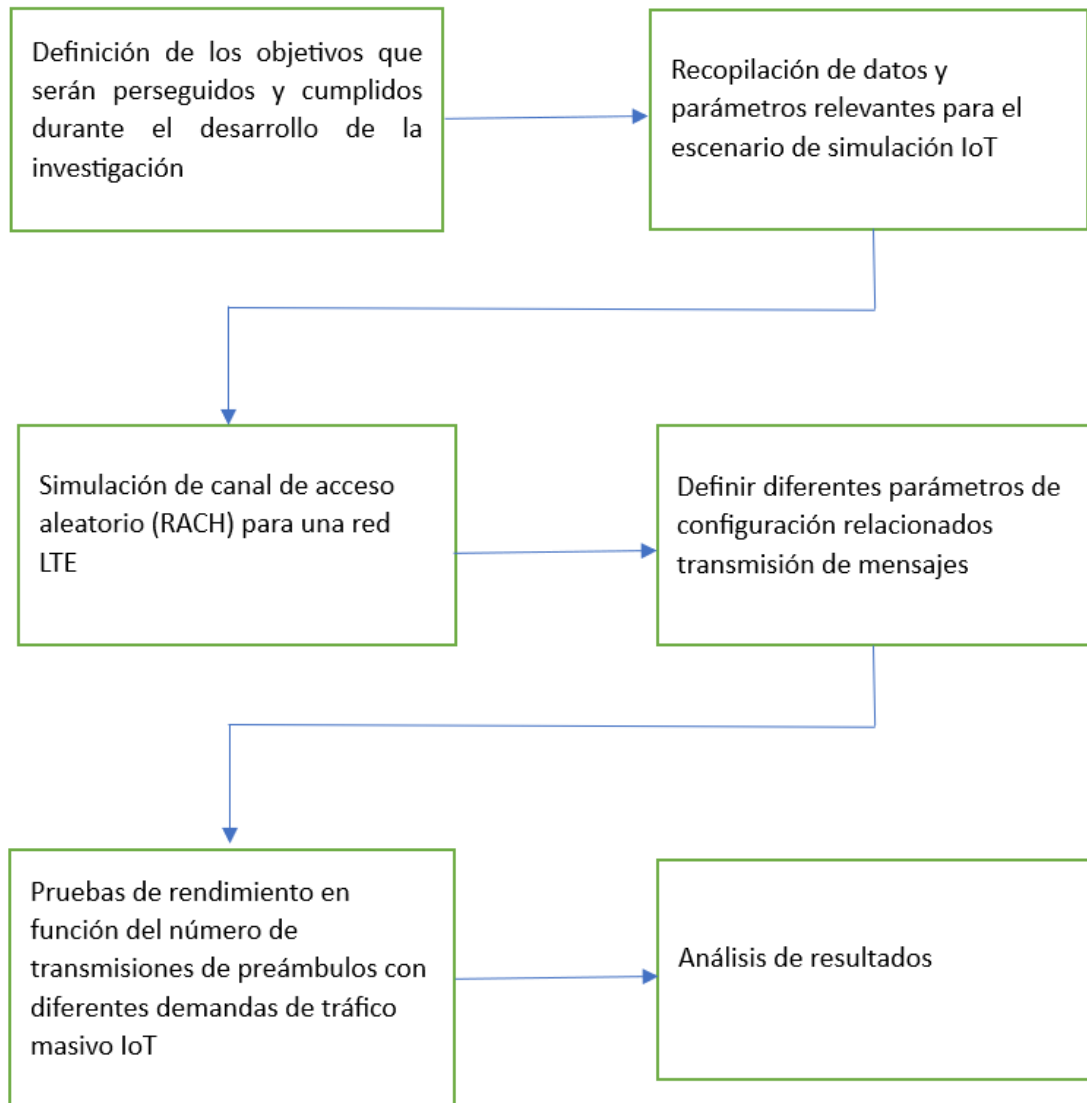
	VARIABLE	CONCEPTO	INDICADORES	INSTRUMENTO
Variables dependientes	Número de transmisiones de preámbulo	Es el número de transmisiones que un dispositivo realiza antes de desechar una solicitud de acceso, haciendo uso de un preámbulo.	Números máximos de transmisiones de preámbulos de 2 a 10	Observación directa a través de un modelo de simulación de transmisión de preámbulos para redes celulares mIoT.
	Probabilidad de acceso satisfactorio	Esta variable indica la probabilidad de que los UEs completen con éxito el RAP.	Probabilidad de acceso satisfactorio entre 0 – 1.	
Variable independiente	Número de dispositivos	Cantidad de dispositivos que intentar acceder a la red de manera satisfactoria.	5000 a 30000 dispositivos IoT	

## 1.6 Procedimiento

### 1.6.1 Métodos de análisis y procesamiento de datos.

Para evaluar el rendimiento del canal de acceso aleatorio en la tecnología IoT, se propuso llevar a cabo un modelado del RAP que facilitara la evaluación de diversas métricas de rendimiento de la red en condiciones variables de demanda de tráfico IoT. Este enfoque permite identificar y comprender el rendimiento del canal de acceso aleatorio. El

procedimiento seguido para llevar a cabo este análisis se detalla en la Figura 4, abordando aspectos específicos y considerando diversas variables para una evaluación exhaustiva del rendimiento del sistema.



*Figura 4 Procedimiento y análisis*

*Fuente: [Autor]*

#### **Definición de Parámetros Iniciales:**

- Establecer la topología de la red LTE, considerando la distribución de dispositivos IoT.
- Definir características del canal RACH, como ancho de banda y frecuencia.

- Identificar parámetros específicos del escenario IoT, como densidad de dispositivos y patrones de tráfico.

#### **Recopilación de Datos y Configuración de Parámetros:**

- Recopilar datos relevantes para la simulación, incluyendo modelos de tráfico IoT y perfiles de usuario.
- Configurar parámetros de simulación, como el tamaño de paquete, intervalos de transmisión y condiciones del canal.

#### **Simulación del Canal RACH en una Red LTE:**

- Utilizar la herramienta de simulación Matlab para modelar el canal de acceso aleatorio.
- Incorporar modelos de propagación y considerar la interferencia entre dispositivos en el acceso al canal RACH.

#### **Definición de Parámetros de Transmisión de Mensajes:**

- Establecer diferentes configuraciones de transmisión de mensajes, variando el número de transmisiones de preámbulos y otros parámetros de acceso.

#### **Pruebas de Rendimiento:**

- Realizar pruebas de rendimiento variando la demanda de tráfico masivo IoT, desde situaciones de baja congestión hasta escenarios de alta densidad de dispositivos.
- Registrar métricas clave, como la probabilidad de acceso satisfactorio.

#### **Análisis de Resultados:**

- Analizar los resultados obtenidos, identificando patrones de rendimiento en relación con el número de transmisiones de preámbulos.
- Evaluar el impacto de la demanda de tráfico en la eficiencia del acceso y la capacidad de la red para manejar situaciones masivas.

#### **1.6.2 Diagrama secuencial del procedimiento de acceso aleatorio**

Antes de iniciar el RAP, los dispositivos deben poseer varios parámetros básicos de configuración, tales como los recursos de tiempo/frecuencia predeterminados, donde se

conceden los intentos de acceso aleatorio (denominados RAOs) y deben realizar la sincronización de enlace ascendente [17]. La estación base transmite esta información periódicamente a través del bloque de información maestro (Máster Information Block, MIB) y los bloques de información del sistema (System Information Blocks, SIBs) [15]. Este procedimiento se realiza a través del canal de acceso aleatorio (RACH) y consta de cuatro etapas indicadas en la figura 5: Transmisión de Preámbulo, Respuesta de Acceso Aleatorio (RAR), Solicitud de Conexión, Resolución de Contención[10].

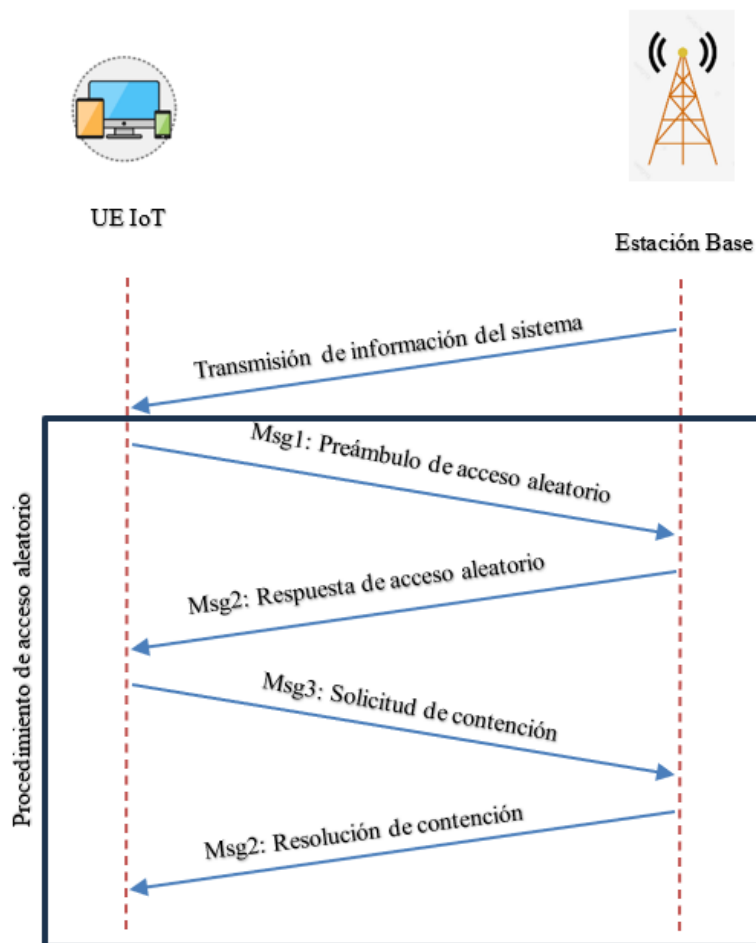


Figura 5 Procedimiento de Acceso Aleatorio RA

Fuente: [Autor]

### 1.6.2.1 Msg1: Transmisión de Preámbulo

La estación base transmite la información de preámbulo de acceso aleatorio hacia el equipo de usuario (UE). En el primer mensaje, los dispositivos trabajan seleccionando de forma aleatoria uno de los preámbulos de un total de 54 existentes para realizar el RAP. El

preámbulo seleccionado se transmite posteriormente por medio del canal físico de acceso aleatorio (Physical Random Access Channel, PRACH) a la BS [13].

Debido a la naturaleza ortogonal del preámbulo, varios dispositivos pueden elegir el mismo preámbulo y acceder a la estación base en la misma oportunidad de acceso aleatorio (RAO), lo que provocará una colisión ya que la BS no podrá decodificar ningún preámbulo recibido, por lo que el acceso se considera un fallido [13].

### **1.6.2.2 Msg2: Respuesta de acceso aleatorio**

Después de recibir los preámbulos mediante el PRACH, la BS envía un mensaje RAR a todos los preámbulos detectados y decodificados correctamente usando el PDCCH (Physical Downlink Control Channel). Los dispositivos proceden a esperar una ventana de tiempo, denominada ventana de respuesta de acceso aleatorio (WRAR), para recibir una concesión de enlace ascendente (Uplink Grant) por parte del BS. Si no se recibe el mensaje RAR durante la ventana de tiempo configurada WRAR se entiende que el preámbulo no fue decodificado y regresa al paso anterior, retransmitiendo con una potencia más elevada e incrementando el número de intentos en la transmisión del preámbulo [13].

Cada subtrama puede contener hasta un mensaje RAR, tres concesiones de enlace ascendente, y cada una contiene respectivamente un preámbulo decodificado exitosamente. La cantidad de WRAR en subtramas es transmitida por la BS a través del bloque de información del sistema (SIB) Tipo 2 [18].

### **1.6.2.3 Msg3: Solicitud de conexión**

El dispositivo envía una solicitud de conexión a la BS utilizando los recursos de enlace ascendente asignados y garantizados en el paso anterior. Este mensaje posee el propósito de la solicitud de acceso y el identificador del dispositivo. Si la BS decodificó correctamente los preámbulos transmitidos por múltiples dispositivos, estos transmitirán la solicitud de conexión utilizando los mismos recursos físicos originando una colisión. Por ello la BS sería incapaz de decodificar los mensajes enviados [14].



#### **1.6.2.4 Msg4: Resolución de Contención**

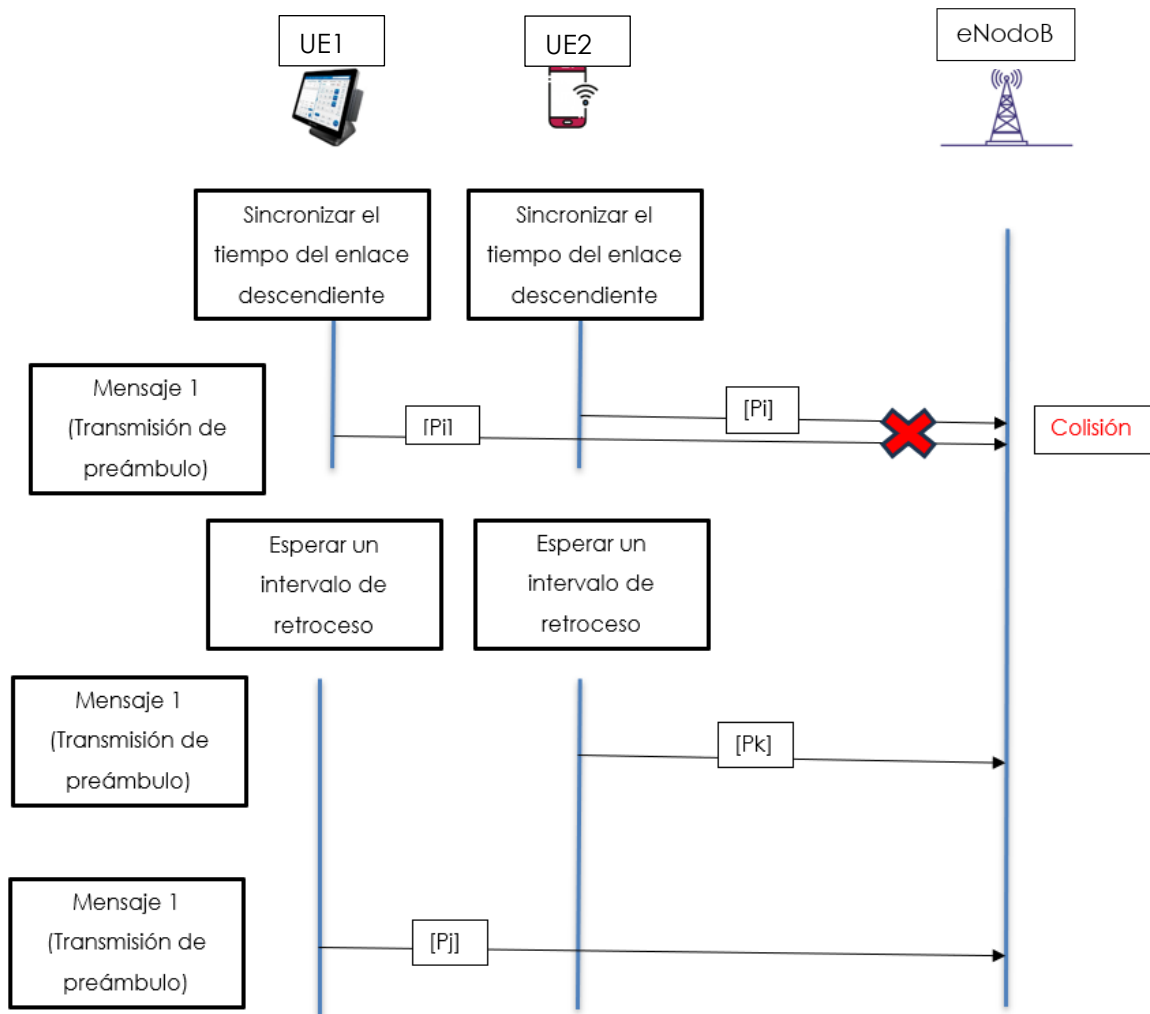
La BS emite este mensaje como respuesta al mensaje anterior para informar al dispositivo que se garantiza un acceso exitoso a los recursos de la red. El dispositivo que no recibe dicho mensaje debe realizar nuevamente otro intento del RAP. Existe un número máximo de intentos de transmisión de RAP después que se descarta la solicitud del dispositivo [13].

#### **1.6.3 Escenarios de colisión**

En la etapa de transmisión del preámbulo del mensaje 1, el UE selecciona de manera aleatoria uno de los preámbulos designados para el Acceso Aleatorio y envía su solicitud en la primera ranura disponible para RA. Dado que los diferentes preámbulos son ortogonales entre sí, varios UEs pueden enviar simultáneamente sus solicitudes de acceso en la misma ranura RA, utilizando preámbulos distintos. En esta situación, el eNodeB (Evolved NodeB) tiene la capacidad de descifrar las solicitudes y calcular el tiempo de transmisión de los terminales [19].

Contrariamente, si dos o más dispositivos eligen el mismo preámbulo, se produce una colisión y el eNodeB no logra detectar las solicitudes correspondientes (como se ilustra en la Figura 6). No obstante, existe la posibilidad de que varios UEs elijan el mismo preámbulo y que el eNodeB lo identifique correctamente. Esto puede ocurrir, por ejemplo, si un UE es considerablemente más fuerte que los demás o si las señales aparecen como transmisiones individuales que atraviesan múltiples rutas de desvanecimiento [19].

En este escenario, la confirmación enviada por el eNodeB desencadenará una transmisión por parte de varios UEs, resultando en una colisión durante la tercera fase del intercambio de información. Este fenómeno puede ser explicado teóricamente mediante el estudio de la interferencia y la competencia en el acceso aleatorio en redes IoT [19].



*Figura 6 Evento de colisión en el mensaje 1*

*Fuente: Autor*

En la etapa subsiguiente, durante la solicitud de conexión en el mensaje 3, al recibir la respuesta del acceso aleatorio, los Equipos de Usuario (UE) enviarán un mensaje de Control de Recursos de Radio (RRC) referente a los recursos asignados en el Canal Uplink Shared (PUSCH). Es importante destacar que los UEs involucrados en una colisión de preámbulos no detectada transmitirán en los mismos bloques de recursos de PUSCH, dando lugar a una nueva colisión, como se ilustra en la Figura 7 [19].

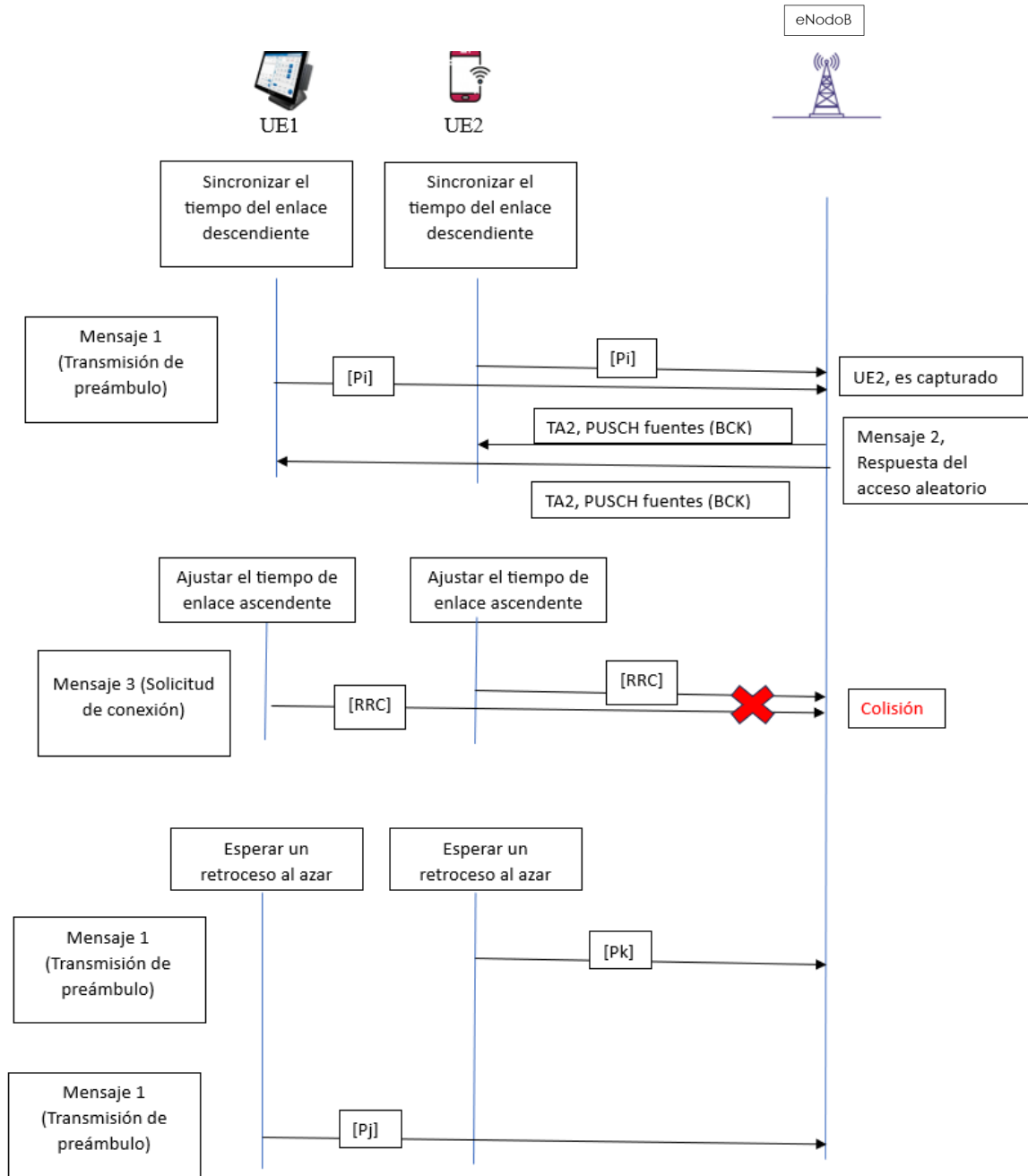


Figura 7 Evento de colisión en mensaje 3

Fuente: Autor

## 1.6.4 Métricas de rendimiento

### 1.6.4.1 Probabilidad de acceso satisfactorio

La probabilidad de acceso satisfactorio, representada por la variable  $P_s$ , se define como la proporción de dispositivos que logran completar con éxito el procedimiento de acceso aleatorio basado en contención, en relación con el número total de dispositivos que ingresaron a la estación base durante un período de tiempo de simulación [13]. Esta definición se encuentra descrita en la ecuación 2.

$$P_s = \frac{n_A}{n_T}$$

*Ecuación 2 Probabilidad de acceso satisfactorio [13]*

#### Donde

$n_A$  = Numero de dispositivos IoT con acceso satisfactorio

$n_T$  =Numero de dispositivos IoT que ingresan a la estación base

### 1.6.4.2 Numero promedio de transmisiones de preámbulo

Se establece a través de la variable  $k$ , y se refiere al recuento estadístico de las transmisiones que un dispositivo realiza utilizando un preámbulo, antes de completar exitosamente el procedimiento de acceso aleatorio después de un intento inicial fallido. Para analizar este parámetro, se utiliza en primer lugar una Función de Densidad de Probabilidad acumulativa (FCD), que se explica detalladamente en la ecuación 3. Esta función se aplica a cada uno de los preámbulos transmitidos hasta que se alcance el número máximo de intentos permitidos ( $k_{max}$ ).

$$p(k_n) = \frac{\sum M_A(k_n)}{n_A}$$

*Ecuación 3. CDF en función al número de preámbulo transmitido.*

*Fuente: [13]*

Donde

$p(k_n)$  = Probabilidad recopilada de “n” transmisión de preámbulo

$M_A(k_n)$  = Conjunto de dispositivos IoT que tuvieron un acceso satisfactorio a la red en “n” transmisiones de preámbulo

$n_A$  = Número total de dispositivos IoT con acceso satisfactorio

Una vez que se han recopilado los diversos datos de probabilidad, se procede a calcular el valor promedio del número de transmisiones requeridas para llevar a cabo con éxito el procedimiento de acceso aleatorio (RAP) y lograr una conexión exitosa a la red.

Este cálculo se realizará mediante la aplicación de la media aritmética ponderada, como se explica en la Ecuación 4. El resultado de este valor medio estará condicionado al número máximo de retransmisiones de preámbulos establecido ( $k_{max}$ ). En nuestro caso, hemos configurado el RACH para admitir un máximo de diez transmisiones de preámbulos [13].

$$\mu = \frac{\sum k_n * p(k_n)}{N}$$

*Ecuación 4 Media aritmética ponderada*

*Fuente: [13]*

Donde

$\mu$  = Media aritmética ponderada

$k_n$  = Numero de preámbulo transmitido

$p(k_n)$  = Probabilidad acumulada de “n” preámbulo.

$N$  = Sumatoria de las probabilidades acumuladas en los diferentes preámbulos.

### **1.6.5 Métricas para QoS (Calidad de servicio)**

Hay medidas clave para evaluar el desempeño del sistema como latencia, cobertura, duración de la batería y capacidad del sistema.

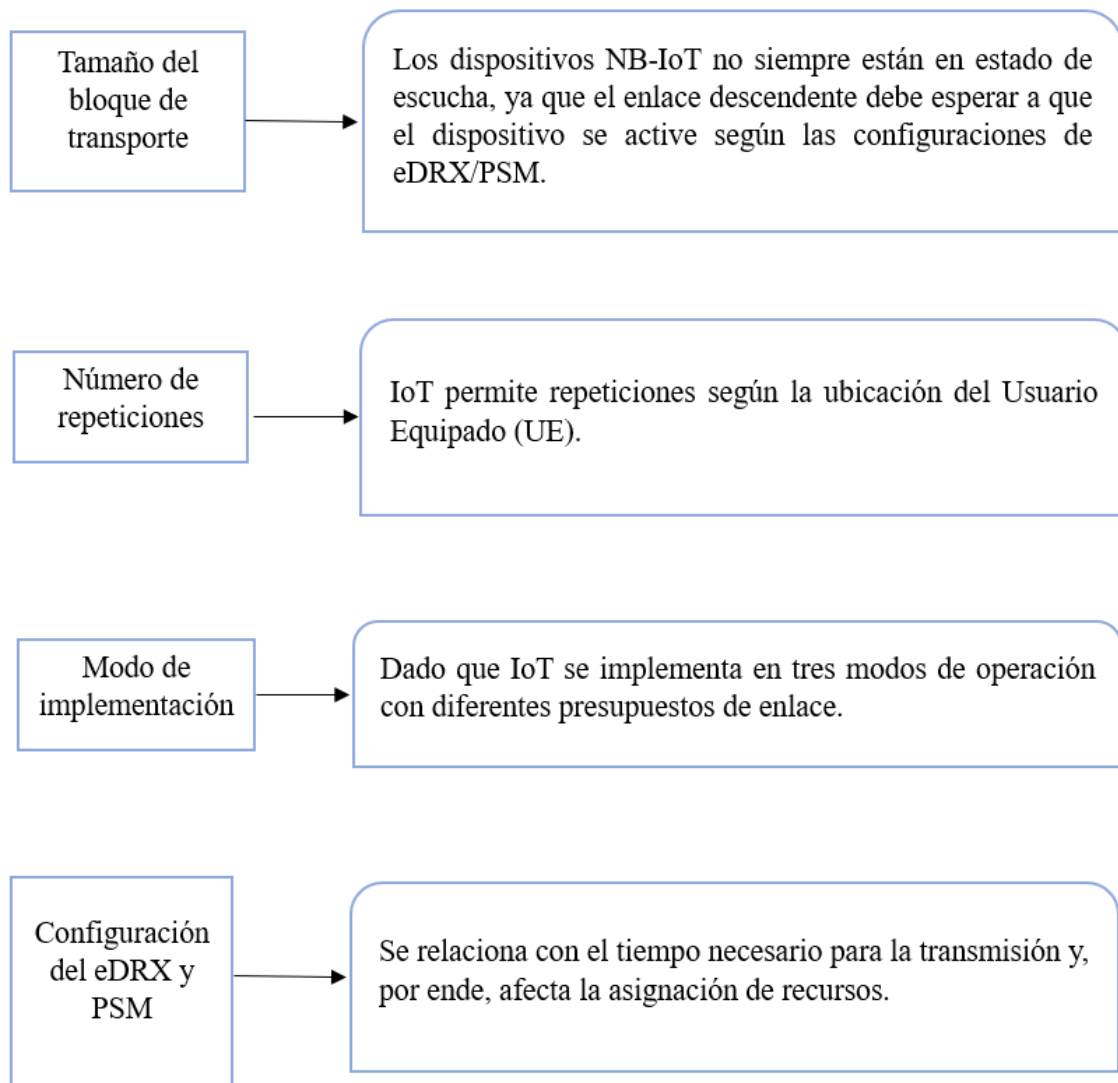
### **1.6.5.1 Cobertura**

IoT define tres clases de cobertura en el canal NPRACH, que son Normal, Extendida y Extrema. La mejora en la cobertura se alcanza mediante el ajuste de las tasas de datos en relación con la cobertura. Esto garantiza que los dispositivos ubicados en áreas alejadas tengan la capacidad de establecer una comunicación confiable con la red, incluso en situaciones donde la velocidad de transferencia de datos sea baja o se encuentre reducida.

A nivel técnico, este enfoque permite adaptar la transmisión de datos según las condiciones de cobertura, proporcionando flexibilidad para mantener una conectividad eficaz en lugares distantes. Este mecanismo asegura que, aunque la velocidad de transmisión pueda ser limitada, se mantenga la fiabilidad de la comunicación, especialmente en ubicaciones remotas donde la conectividad puede ser un desafío [20].

### **1.6.5.2 Latencia**

Es un factor crucial en IoT, y las estrategias implementadas tienen como enfoque mejorar la amplitud de la cobertura, extender la vida útil de la batería y aumentar la capacidad del sistema, todo con el propósito de minimizar la latencia [20]. La velocidad de respuesta en IoT se ve afectada por varios elementos, entre los cuales se incluyen:



*Figura 8 Elementos que afectan la respuesta en IoT*

*Fuente: [Autor]*

### **1.6.5.3 Duración de batería**

Los estándares del 3GPP, específicamente las versiones 12 y 13, han incorporado características como el modo de cobertura discontinua extendida (eDRX) y el modo de ahorro de energía (PSM). Estas adiciones están diseñadas para respaldar operaciones específicas y mejorar la eficiencia energética de los dispositivos.

En términos sencillos, estas funciones permiten que el dispositivo desactive su transceptor durante ciertos períodos de tiempo, utilizando en su lugar un oscilador para mantener una referencia constante del tiempo. Esto asegura que el dispositivo pueda salir del modo PSM o eDRX en momentos predeterminados, contribuyendo así a una gestión más eficaz del consumo eléctrico [20].



## CAPÍTULO IV

### 1.7 Resultados y discusión

En el proceso del desarrollo de la investigación, se estableció la probabilidad de acceso satisfactorio (Ps) como la métrica principal para evaluar el rendimiento de las redes celulares de Internet de las cosas. Ps es una métrica fundamental para determinar con qué eficiencia los dispositivos IoT pueden acceder a la red y transmitir datos con éxito.

Como primer punto se parte de un escenario base en el que se llevarán a cabo pruebas con transmisiones de preámbulos que van desde 2 hasta 10, con el objetivo de identificar un punto óptimo, es decir, encontrar una cantidad de transmisión de preámbulo que resulte en un acceso satisfactorio más alto. Este análisis se realizará en un contexto de escala masiva, abarcando una cantidad de dispositivos que oscila entre 5000 y 30000.

A través de la simulación y el análisis de datos, se obtuvieron valores específicos de Ps en función de diferentes parámetros y cargas de tráfico, lo que permitió comprender cómo se ve afectada esta probabilidad en diversos escenarios.

Un paso crucial en la investigación fue el diseño y desarrollo de un modelo de simulación que permitiera evaluar el rendimiento de las redes mIoT en términos del número de transmisiones de preámbulos. Este modelo se implementó utilizando datos y configuraciones de red similares a las utilizadas en las comunicaciones mIoT.

En esta sección, se detallarán los resultados obtenidos a través de una simulación de RACH. La evaluación de los datos se realizó de acuerdo con el enfoque experimental establecido.

#### 1.7.1 Resultados de probabilidad de acceso satisfactorio en función de diversas cargas de tráfico.

##### Escenario 1 (Base)

Se realizó múltiples simulaciones con diferentes valores de transmisión de preámbulos (2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10) para analizar la variación de la probabilidad de acceso satisfactorio en relación con la cantidad de dispositivos IoT. Esto brindará información y resultados acerca de la evolución de la probabilidad de acceso satisfactorio a medida que se incrementa la cantidad de dispositivos IoT.

Tabla 2 Probabilidad de acceso satisfactorio ( $P_s$ ) para diferentes valores de número máximo de intentos de transmisión del preámbulo ( $r_{max}$ ) en  $r_{max} = 2, r_{max} = 3, r_{max} = 4, r_{max} = 5, r_{max} = 6, r_{max} = 7, r_{max} = 8, r_{max} = 9, y r_{max} = 10$ .

Usuarios	Ps								
	$r_{max}=2$	$r_{max}=3$	$r_{max}=4$	$r_{max}=5$	$r_{max}=6$	$r_{max}=7$	$r_{max}=8$	$r_{max}=9$	$r_{max}=10$
5000	0.9136	0.9850	0.9980	0.9994	1	1	1	1	1
10000	0.8459	0.9582	0.9838	0.9971	0.9992	0.9997	0.9999	1	1
15000	0.7819	0.8968	0.9397	0.9574	0.9636	0.9765	0.9804	0.9778	0.9838
20000	0.7102	0.7940	0.8212	0.8401	0.8408	0.8192	0.8000	0.7371	0.7079
25000	0.6328	0.69412	0.7069	0.7059	0.6623	0.6206	0.5567	0.4966	0.4417
30000	0.5654	0.60197	0.5991	0.5611	0.4969	0.4491	0.3868	0.3542	0.3181

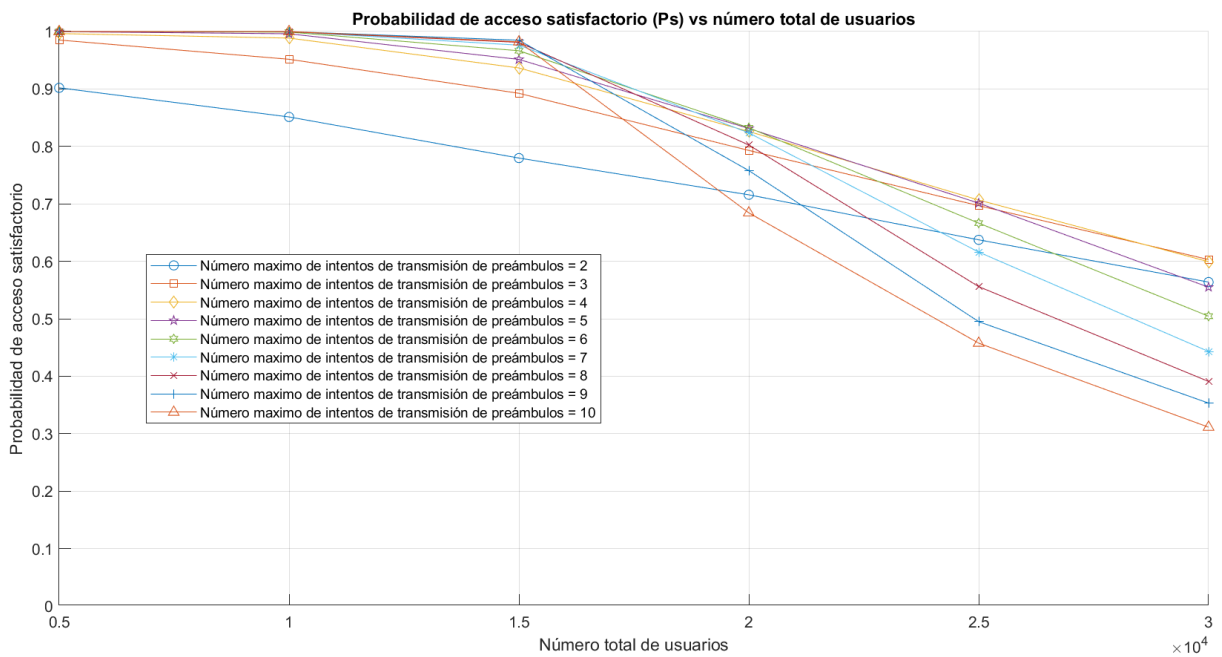


Figura 9 Probabilidad de acceso satisfactorio para diferentes valores de número máximo de intentos de transmisión del preámbulo ( $r_{max}$ ) en  $r_{max} = 2, r_{max} = 3, r_{max} = 4, r_{max} = 5, r_{max} = 6, r_{max} = 7, r_{max} = 8, r_{max} = 9, y r_{max} = 10$ .

Fuente: [Autor]

## **Probabilidad de acceso satisfactorio con un valor máximo de transmisión del preámbulo de 2**

En la Tabla 2, se presentan los resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio para diferentes cargas de usuarios (TotalUEs) al configurar el número máximo de intentos de transmisión del preámbulo en 2. Se observa que, con un valor bajo de transmisión de preámbulo, la Ps varía con la carga de usuarios. Con una carga de 5000 usuarios, la Ps es de 0.9136, lo que indica que alrededor del 91.36% de los usuarios logran un acceso satisfactorio. A medida que aumenta la carga de usuarios, la Ps disminuye gradualmente.

La figura 9 se visualiza la variación de la probabilidad de acceso satisfactorio en la red a medida que cambia el número total de usuarios en la red, en este caso se colocó un valor de retransmisiones de preámbulo de 2. A medida que aumenta el número de UEs en la red (a lo largo del eje X), la Ps generalmente tiende a disminuir. Esto es esperado, ya que con más usuarios compitiendo por recursos limitados (como canales de acceso al medio), es más probable que se produzcan colisiones y, por lo tanto, la Ps disminuye. Los valores específicos de Ps en la gráfica pueden variar dependiendo de cómo se haya implementado y configurado la red, así como de las condiciones de tráfico simuladas.

En general, se busca un alto valor de Ps para proporcionar una buena experiencia de servicio a los usuarios.

Es importante notar que Ps es una métrica clave en redes de comunicaciones, ya que refleja la eficiencia y la capacidad de la red para satisfacer la demanda de los usuarios.

## **Probabilidad de acceso satisfactorio con un valor máximo de transmisión del preámbulo de 3**

Al emplear una transmisión de preámbulo de 3 en comparación con una transición de 2, se observó un aumento significativo en los valores de la probabilidad de éxito (PS). Para la carga total de usuarios, se registró un incremento aproximado del 10%.

En el caso específico de una carga de 5000 usuarios, la probabilidad de accesos satisfactorios alcanzó un valor de 0.9585, indicando un alto nivel de éxito en las transmisiones. Para una carga de usuarios masiva de 30000, se logró una PS de 1, lo que equivale al 100%. Este

resultado sugiere que todos los usuarios que intentaron acceder lo hicieron sin encontrar ninguna dificultad (Figura 9).

Esta configuración de preámbulo de 3 parece haber mejorado significativamente la eficiencia y la confiabilidad del sistema, especialmente en escenarios de alta demanda de usuarios.

#### **Probabilidad de acceso satisfactorio con un valor máximo de transmisión del preámbulo de 4**

En la Tabla 2, se presentan las Ps correspondientes a diferentes cargas de usuarios cuando el número de transición de preámbulo se establece en 4. Los resultados demuestran que la Ps es más alta en comparación con una transmisión igual a 3. Para una carga de 5000 usuarios, la Ps es de 0.9980, lo que indica un acceso satisfactorio para aproximadamente el 99.80% de los usuarios. A medida que aumenta la carga de usuarios, la Ps disminuye gradualmente, pero sigue siendo alta.

Cuando el valor de transmisión de preámbulo se incrementa de 3 a 4, la Ps muestra una tendencia a mejorar a medida que aumenta el número máximo de transmisiones de preámbulo. Esto se debe a que, con un número limitado de intentos, aumenta la probabilidad de que al menos una transmisión de preámbulo sea exitosa, incluso en condiciones de baja congestión. Esto mejora la Ps.

En la Gráfica 9, se observa cómo la probabilidad de acceso satisfactorio (Ps) varía con la carga de usuarios para un valor de preámbulo de 4. La Ps disminuye a medida que aumenta la carga de usuarios, pero la disminución es más gradual en comparación con el caso de preámbulo = 3. Esto indica que permitir hasta 4 intentos de transmisión de preámbulos mejora el rendimiento de la red en términos de acceso satisfactorio.

#### **Probabilidad de acceso satisfactorio con un valor máximo de transmisión del preámbulo de 5**

Cuando se configuró la transición de preámbulo de longitud 4 a 5, se observó un ligero aumento en la probabilidad de éxito (PS) para cargas de tráfico moderado (figura 9). Sin embargo, a medida que se incrementó el tráfico, se evidenció una leve disminución en la PS.

En detalle, para una cantidad de usuarios de 5000, se logró una PS del 99%, indicando un rendimiento óptimo incluso con esta modificación en la longitud del preámbulo. No obstante, al enfrentar una carga masiva de usuarios de 30000, la PS se redujo a 0.5611, señalando una disminución en la eficiencia del sistema en condiciones de alta demanda. A pesar de esta reducción, la probabilidad de acceso satisfactorio sigue siendo notablemente alta.

Este fenómeno sugiere que el cambio en la longitud del preámbulo puede afectar la capacidad del sistema para gestionar cargas de tráfico extremas, y se requiere una evaluación más detallada para comprender su impacto en la fiabilidad del sistema.

### **Probabilidad de acceso satisfactorio con un valor máximo de transmisión del preámbulo de 6**

En la Tabla 2, se presentan los resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio cuando el número de transmisión de preámbulo se configura en 6. La Ps es igual a 1 para las cargas de usuarios de 5000, lo que significa que, con un valor transmisión de 6, todos los 5000 usuarios tienen un acceso satisfactorio.

Esto indica un alto rendimiento en términos de Ps. Sin embargo, en escenarios de alta densidad (es decir, con una gran cantidad de usuarios compitiendo por el acceso), tener un mayor número de transmisiones de preámbulo ya no garantiza un aumento significativo en la Ps. En cambio, puede resultar en una mayor interferencia y colisiones, lo que reduce la eficiencia del acceso, la Ps en lugar de aumentar, comienza a disminuir en comparación con un valor de transición igual a 4.

Esta disminución de la Ps con un número de transmisión de preámbulo igual a 6 en un escenario de alta densidad (30,000 UEs) se debe a una competencia excesiva por el acceso al canal en situaciones de alta congestión. En otras palabras, el aumento en el número de transmisiones de preámbulo más allá de 4 para un tráfico masivo no proporciona una mejora significativa en la Ps, pero sí introduce una sobrecarga adicional en el sistema. Esto se debe a que a medida que se incrementa el número de transmisión de preámbulo, se alcanza un punto en el que el canal se satura debido a la gran cantidad de dispositivos que intentan acceder simultáneamente. Esto puede llevar a colisiones y una mayor interferencia, lo que

reduce la probabilidad de acceso satisfactorio, ya que los dispositivos se superponen y se vuelven menos efectivos en la comunicación.

La probabilidad de colisión se produce cuando dos o más dispositivos IoT intentan acceder a la red utilizando el mismo preámbulo de manera simultánea dentro de un período de tiempo determinado. Esta situación de colisión es influenciada por dos factores clave: la intensidad de acceso aleatorio generada por los dispositivos IoT y la capacidad de la señalización de acceso aleatorio (RACH) que la red puede proporcionar.

Esta probabilidad de colisión se incrementa a medida que más dispositivos IoT intentan acceder simultáneamente a la red y depende de la cantidad de dispositivos en el área de cobertura, así como de la capacidad de la red para gestionar estos intentos de acceso.

Cuando ocurre una colisión durante un intento de acceso satisfactorio y dicho intento resulta en un fallo, el dispositivo IoT debe esperar un cierto período de tiempo antes de realizar una nueva solicitud de acceso. Este período de espera necesario introduce una latencia en el proceso de acceso al canal.

### **Probabilidad de acceso satisfactorio con un valor máximo de transmisión del preámbulo de 7**

Al configurar la transmisión de preámbulo en 7, se registraron diversos resultados que se detallan en la tabla 2. En este escenario, la Ps se mantiene elevada para una cantidad ligera de dispositivos. Sin embargo, al aumentar la carga de dispositivos a partir de 15000 usuarios, se observa una reducción considerable en la Ps, como se evidencia en la figura 9.

Para una carga de 15000 usuarios, la PS se sitúa en 0.9765, indicando un rendimiento satisfactorio, pero con una disminución en comparación con cargas más bajas. A medida que se continúa aumentando el número de transmisiones de preámbulo, la Ps sigue disminuyendo, alcanzando un valor de 0.4491 para una carga masiva de 30000 usuarios.

Estos resultados sugieren que la configuración de preámbulo 7 puede no ser óptima para cargas de tráfico más intensas, mostrando una tendencia a una disminución significativa en la PS a medida que la carga de dispositivos aumenta. Este hallazgo destaca la importancia

de encontrar un equilibrio adecuado en la configuración del preámbulo para optimizar el rendimiento del sistema en diferentes condiciones de carga.

### **Probabilidad de acceso satisfactorio con un valor máximo de transmisión del preámbulo de 8**

Con valores más altos de transmisiones de preámbulos, se brinda una mayor tolerancia antes de considerar un intento de acceso como fallido. Esto proporciona una ventaja en situaciones de baja congestión y competencia por el canal, ya que los dispositivos tienen más oportunidades para acceder al canal de comunicación con éxito.

En la Tabla 2, se presentan los resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio cuando se configura en 8 el número de transmisiones de preámbulos. La Ps es muy alta, y se mantiene por encima de 0.99 incluso para cargas de usuarios de 5000 a 15000. Esto indica un acceso satisfactorio para más del 99% de los usuarios. A medida que aumenta la carga de usuarios, la Ps disminuye, alcanzando el 55.67% para 25000 usuarios y 38.68% para 30000 usuarios.

La Ps sigue siendo alta para cargas de usuarios bajas, pero tiene una disminución más rápida que en casos anteriores a medida que aumenta la carga de usuarios.

### **Probabilidad de acceso satisfactorio con un valor máximo de transmisión del preámbulo de 9**

Al realizar pruebas con un valor de transmisión de preámbulo de 9, se observa un patrón consistente con los escenarios anteriores. La Probabilidad de Éxito se mantiene elevada hasta una carga de usuarios de 15000, lo cual indica un rendimiento satisfactorio en condiciones de tráfico moderado.

No obstante, conforme aumenta la demanda de usuarios, se observa una tendencia a la disminución en la PS. Este fenómeno es especialmente evidente con un 5% menos de Ps en relación con la configuración de transmisión de preámbulo de 8.

Este resultado sugiere que, al igual que en configuraciones anteriores, la elección del número de transmisiones de preámbulo es crucial para adaptarse a las variaciones en la carga de usuarios.

### **Probabilidad de acceso satisfactorio con un valor máximo de transmisión del preámbulo de 10**

Para una configuración de un número de transmisión de preámbulo igual a 10, se permite un máximo de 10 intentos de transmisión de preámbulos, en la tabla 2 se puede observar que la probabilidad de acceso satisfactorio es igual a 1 para una carga de 5000 y 10000 usuarios, lo que significa un acceso satisfactorio para todos los usuarios. Sin embargo, a medida que aumenta la carga de usuarios, la Ps disminuye más rápidamente en comparación con otros valores de transmisiones de preámbulos. La reducción de la Ps a medida que se agregan más usuarios sugiere que, en este escenario el sistema tiene dificultades para manejar una gran cantidad de dispositivos usuarios. Esto podría resultar en una competencia más intensa por los recursos de la red y un mayor número de transmisiones de preámbulo fallidas.

En general, los resultados sugieren que permitir más intentos de transmisión de preámbulos conduce a una Ps más alta, especialmente cuando la carga de usuarios es baja. Sin embargo, a medida que la carga de usuarios aumenta, la Ps disminuye en escenario de tráfico masivo. Esto indica que ajustar un número de transmisión de preámbulo puede ser beneficioso para garantizar un acceso satisfactorio en condiciones de baja carga, pero puede haber un punto de rendimiento óptimo en términos de equilibrio entre recursos y rendimiento a medida que aumenta la carga de usuarios. Este fenómeno destaca la importancia de encontrar un equilibrio óptimo entre el número de transmisiones de preámbulo permitidas y la densidad de dispositivos en el despliegue de comunicaciones masivas. Por lo tanto, la elección de un número de transmisión de preámbulo debe ser cuidadosamente considerada en función de la densidad prevista de dispositivos en la red.



## 1.7.2 Resultados de número promedio de transmisiones de preámbulo para los accesos exitosos en función de diversas cargas de tráfico

### Escenario 2

Estos resultados tienen importantes implicaciones para el diseño y la gestión de redes IoT, ya que resaltan cómo el límite de intentos de transmisión de preámbulo afecta la eficiencia y el uso de recursos en entornos de alta densidad y congestión. Además, estos hallazgos pueden ser fundamentales para optimizar la eficiencia de acceso en escenarios de IoT masivos.

Cuanto menor sea EKM (número promedio de transmisiones de preámbulo), mejor será el rendimiento de la red, ya que los dispositivos IoT pueden acceder a la red con un menor número de intentos. Si EKM aumenta significativamente a medida que aumentan los usuarios, podría indicar un mayor grado de congestión o una asignación ineficiente de recursos.

A continuación, se presenta una visión detallada de los resultados de EKM para distintos valores de transmisión de preámbulos en el contexto de despliegues de comunicaciones masivas en Internet de las cosas. Estos resultados arrojan luz sobre la eficiencia y los desafíos operativos en la gestión de redes IoT.

*Tabla 3 Número promedio de transmisiones de preámbulo para diferentes valores de número máximo de intentos de transmisión del preámbulo en  $r_{max} = 2$ ,  $r_{max} = 3$ ,  $r_{max} = 4$ ,  $r_{max} = 5$ ,  $r_{max} = 6$ ,  $r_{max} = 7$ ,  $r_{max} = 8$ ,  $r_{max} = 9$ , y  $r_{max} = 10$*

TotalUEs	EKM								
	$r_{max}=2$	$r_{max}=3$	$r_{max}=4$	$r_{max}=5$	$r_{max}=6$	$r_{max}=7$	$r_{max}=8$	$r_{max}=9$	$r_{max}=10$
5000	1.3730	1.5127	1.5204	1.5727	1.5378	1.5418	1.5382	1.5516	1.5448
10000	1.3889	1.5949	1.6939	1.7300	1.7442	1.7626	1.7593	1.7717	1.7447
15000	1.4232	1.7068	1.8951	2.0558	2.2222	2.2665	2.3666	2.4628	2.5421
20000	1.4526	1.7814	2.0848	2.3358	2.5866	2.8544	3.1034	3.3407	3.4432
25000	1.4687	1.8380	2.1705	2.4884	2.7491	3.0151	3.1726	3.4199	3.4416
30000	1.4753	1.4740	2.2380	2.5762	2.8396	3.1265	3.2111	3.3943	3.4396

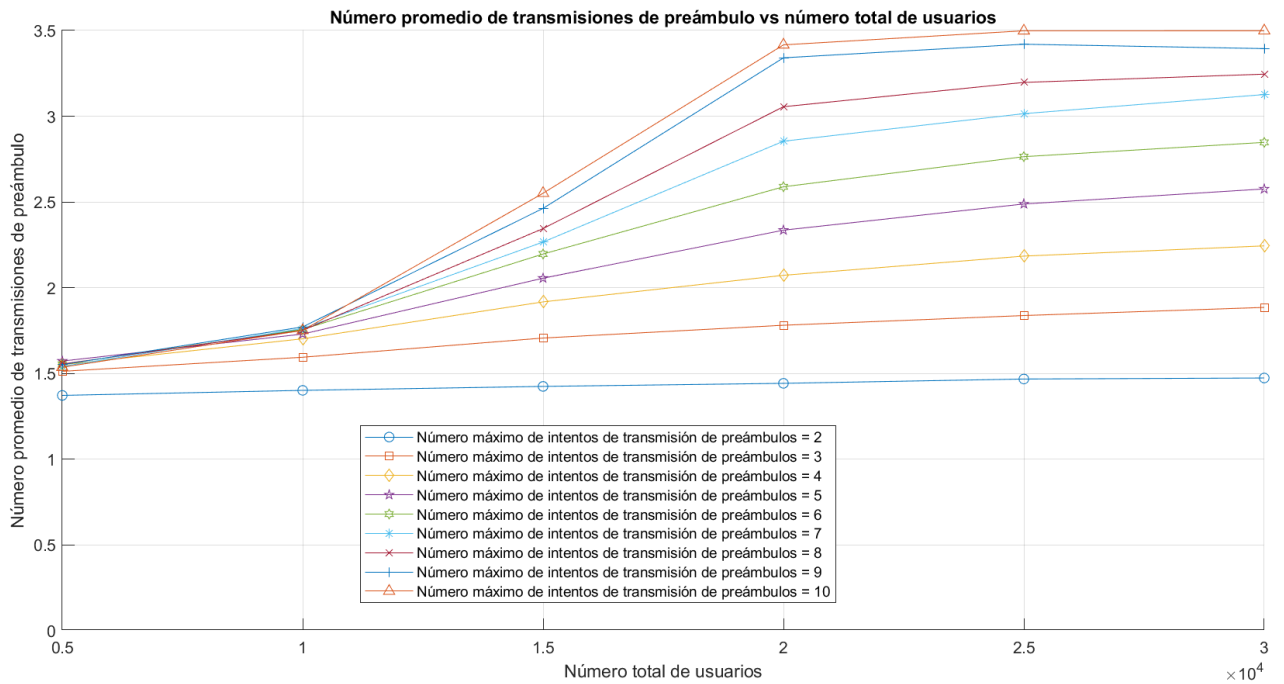


Figura 10 Número promedio de transmisiones de preámbulo para diferentes valores de número máximo de intentos de transmisión del preámbulo en  $r_{max} = 2$ ,  $r_{max} = 3$ ,  $r_{max} = 4$ ,  $r_{max} = 5$ ,  $r_{max} = 6$ ,  $r_{max} = 7$ ,  $r_{max} = 8$ ,  $r_{max} = 9$ , y  $r_{max} = 10$

Fuente: [Autor]

### Número promedio de transmisiones de preámbulo para los accesos exitosos con un valor máximo de transmisión del preámbulo de 2 y 3

En la Tabla 3, se observa que, con un valor de transmisión de preámbulo de 2, el EKM aumenta a medida que el número total de dispositivos se incrementa. Este fenómeno se refleja en la Figura 10, donde se observa un aumento en el EKM a medida que la densidad de dispositivos crece. Los valores de EKM fluctúan entre 1.3730 y 1.4753, esta variación refleja que, en promedio, un número relativamente bajo de transmisiones de preámbulo es necesario para lograr el acceso satisfactorio. Esto sugiere una eficiencia en el uso de recursos. Al aumentar el valor de transmisión de preámbulo a 3, se registra un incremento aproximado del 2% en el valor de Eficiencia de EKM para toda la carga de tráfico (Figura 10), en comparación con un máximo de transmisión de preámbulo de 2. Es importante destacar que, a pesar de este aumento, el valor absoluto de EKM sigue siendo menor.

### **Número promedio de transmisiones de preámbulo para los accesos exitosos con un valor máximo de transmisión del preámbulo de 4 y 5**

Al incrementar el límite de intentos de transmisión a 4, los valores de EKM se elevan progresivamente, oscilando entre 1.5204 y 2.2380, dando como resultado un aumento en el EKM a medida que aumenta el número de dispositivos. Este aumento en el EKM sugiere que se necesitan más intentos promedio de transmisiones de preámbulo para un acceso exitoso a medida que la densidad de dispositivos en la red se incrementa.

Cuando se incrementa la transmisión de preámbulo a 5, se observa que el EKM se mantiene en un valor bajo para cargas de tráfico ligeras. Sin embargo, a medida que la carga aumenta, especialmente a partir de 15000 usuarios, se registra un aumento leve en el valor de EKM. Este aumento es notable al alcanzar una carga de 30000 usuarios, donde el valor de EKM se sitúa en 2.5762.

### **Número promedio de transmisiones de preámbulo para los accesos exitosos con un valor máximo de transmisión del preámbulo de 6 y 7**

La Tabla 3 y Figura 10 indican que, con un valor de transmisión de preámbulo de 6, el EKM sigue incrementando a medida que la densidad de dispositivos se incrementa. Sin embargo, es importante destacar que, en comparación con los valores anteriores de transmisiones de preámbulo de 4 y 5, el EKM muestra un crecimiento más acelerado a medida que se aumenta el número de dispositivos, lo que sugiere que, en este caso, una mayor densidad de dispositivos aumenta aún más el número promedio de intentos de transmisión de preámbulos requeridos.

Cuando se incrementa el número máximo de transmisiones de preámbulo a 7, se observa un aumento más notable en el EKM. Este incremento es cada vez más evidente a medida que la carga de usuarios aumenta, llegando a un valor significativo de 3.1265 para una carga masiva de 30000 usuarios.

### **Número promedio de transmisiones de preámbulo para los accesos exitosos con un valor máximo de transmisión del preámbulo de 8 y 9.**

Cuando se permite un máximo de 8 intentos de transmisión de preámbulos (indicado en la Tabla 3 y Figura 10), el EKM continúa creciendo con el aumento de la densidad de dispositivos. Aquí, se observa que el EKM crece más rápidamente en comparación con los valores anteriores de número de transmisiones de preámbulo. Esto sugiere que, en este escenario, una mayor densidad de dispositivos requiere un número significativamente mayor de intentos promedio para lograr un acceso exitoso.

Al configurar un intento máximo de transmisión de preámbulo de 9, se observa un aumento en el valor de EKM. Específicamente, para una carga de 20000 usuarios, se registra un valor de 3.3407. Este valor continúa aumentando a medida que la carga de tráfico se incrementa.

### **Número promedio de transmisiones de preámbulo para los accesos exitosos con un valor máximo de transmisión del preámbulo de 10**

Finalmente, en la Tabla 3 y Gráfica 10, se observa que, con un valor de transmisión de preámbulo de 10, el EKM muestra un patrón similar al de 9, pero con valores aún más altos. A medida que la densidad de dispositivos aumenta, el EKM crece significativamente. Esto implica que, en este escenario, una alta densidad de dispositivos junto con un mayor número de intentos de transmisión permitidos resulta en un EKM sustancialmente alto, lo que significa que en promedio se requieren numerosos intentos de transmisión de preámbulos para lograr un acceso exitoso.

### **1.7.3 Probabilidad de acceso satisfactorio en función del número máximo de transmisiones de preámbulo**

#### **Escenario 3**

Para una mejor comprensión de los resultados obtenidos se han generado dos gráficas que representan diferentes aspectos de los datos recopilados. La figura 11 se centran en la Probabilidad de Acceso Satisfactorio en función del número máximo de transmisiones de preámbulo, mientras que la figura 12 se enfocan en el Promedio de Transmisiones de Preámbulo (EKM) en función de número máximo de transmisiones de preámbulo. Cada gráfica muestra cómo estos valores evolucionan para distintos niveles de usuarios. A continuación, analizaremos estos resultados en detalle.

Los valores de Ps se han obtenido para varias intensidades de tráfico, que van desde 5000 UEs (congestión ligera) hasta 30000 UEs (congestión intensa). Cada línea representa un valor específico de usuarios y muestra cómo varía Ps en función de la configuración de transmisión de preámbulo. La variación de Ps es claramente visible en la gráfica 11.

Se puede observar cómo diferentes cantidades de usuarios afectan la relación entre Ps y número máximo de transmisiones de preámbulo.

La presencia de múltiples líneas permite una comparación directa entre diferentes escenarios de usuarios y sus efectos en la probabilidad de acceso satisfactorio.

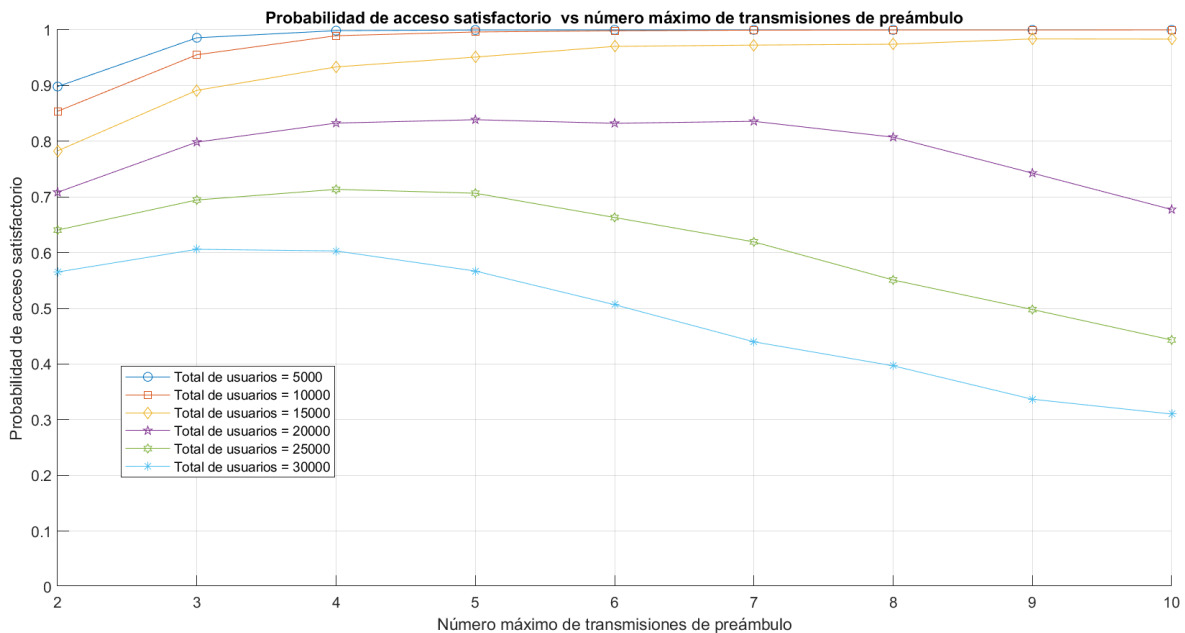


Figura 11 Probabilidad de Acceso Satisfactorio en función del número máximo de transmisión de preámbulos.

Fuente: [Autor]

En la figura 12, se aborda el promedio de transmisiones de preámbulo en relación con el número máximo de transmisiones de preámbulo. EKM es un indicador crítico de la eficiencia de la red y proporciona información valiosa sobre la cantidad de recursos utilizados en los intentos de acceso. Al igual que en las gráficas anteriores, se emplean

marcadores para representar diferentes valores de carga de usuarios, lo que facilita la comprensión de cómo EKM se ve afectado por la configuración de la red y los intentos de transmisión de preámbulo.

En la gráfica 12 se puede notar claramente que el valor de EKM aumenta a medida que se incrementa el número máximo de intentos de transmisión de preámbulo. Sin embargo, lo interesante es que este aumento en EKM está directamente relacionado con la cantidad de usuarios totales en la red.

Por ejemplo, al analizar la gráfica para un escenario con 5000 usuarios, se observa que EKM es menor para todos los valores de transmisiones de preámbulos en comparación con el escenario de 30000 usuarios. Esto indica que, con una menor densidad de usuarios, la red es más eficiente en la transmisión de preámbulos, lo que se traduce en un menor número promedio de transmisiones requeridas.

En contraste, para el escenario de 30000 usuarios, EKM continúa aumentando a medida que se incrementa un preámbulo. Esto sugiere que, en un entorno más congestionado con un mayor número de usuarios, se requieren más intentos de transmisión de preámbulo para mantener la eficiencia en el acceso a la red.

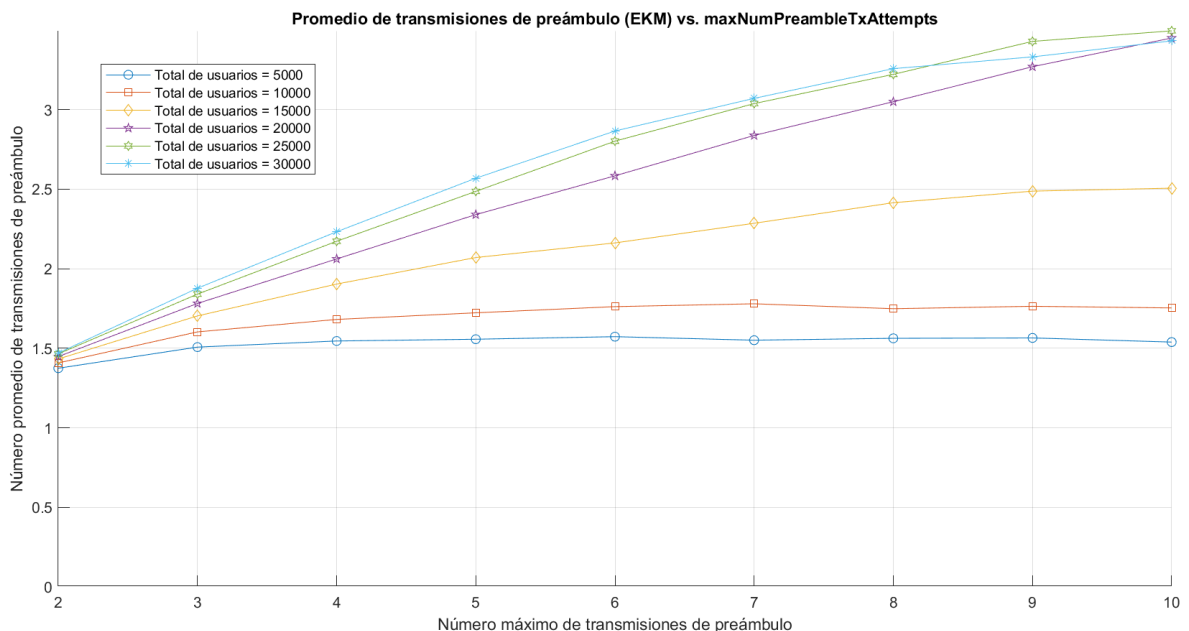


Figura 12 Promedio de Transmisiones de Preámbulo en función de del número máximo de transmisión de preámbulos.

Fuente: [Autor]

### 1.7.4 Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio en función de calidad de servicio.

#### Escenario 4

En esta sección, se exponen los hallazgos derivados de la evaluación de desempeño de Ps en lo que respecta a la Calidad de Servicio (QoS). Cabe destacar que la calidad de servicio es un factor crucial en el análisis de Ps ya que impacta directamente en la eficacia de las transmisiones, la satisfacción del usuario, y se ha considerado durante el proceso de configuración de los parámetros de transmisión. Específicamente, se llevaron a cabo evaluaciones con diferentes números de intentos de transmisión de preámbulo, que variaron desde 2 hasta 10. El propósito de esta sección es presentar y analizar los resultados de rendimiento de Ps en relación con la QoS, considerando las diversas configuraciones de intentos de transmisión de preámbulo.

La figura 13 muestra cómo varía el Número Promedio de Transmisiones de Preámbulo en función de la cantidad de Usuarios para casos donde el valor de Ps  $\geq$  a 0.9, lo que indica una alta calidad de servicio. Cada línea en la gráfica representa un valor único de Ps, y la variación de EKM a medida que los usuarios aumentan. Esta gráfica permite identificar cómo el EKM se comporta en situaciones de alta calidad de servicio y cómo esta métrica se relaciona con la cantidad de usuarios.

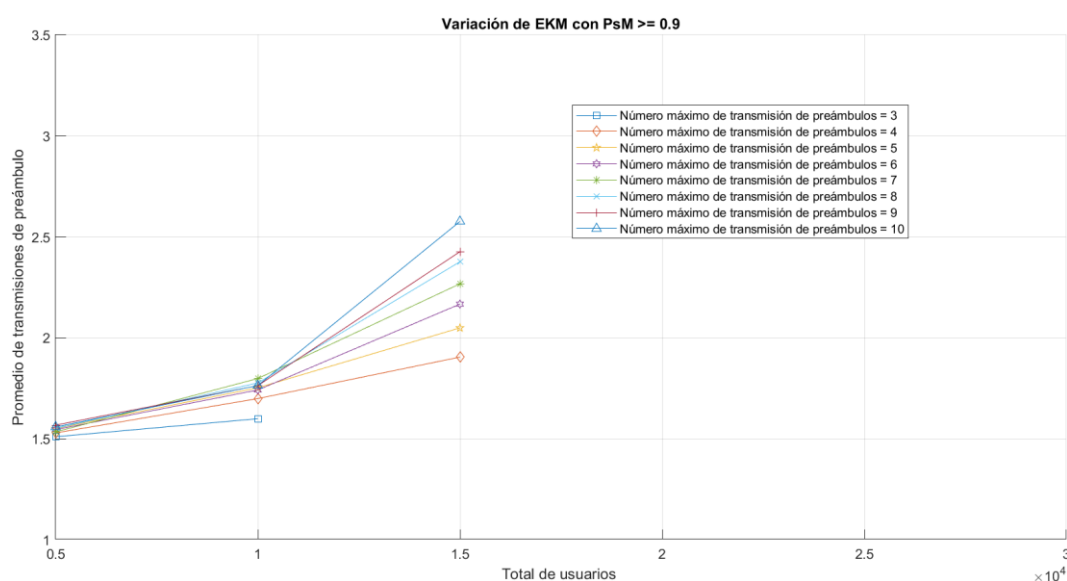


Figura 13 Número Medio de Transmisiones de Preámbulo en función de la cantidad de Usuarios con QoS de Ps  $\geq$  0.90

Fuente: [Autor]

En la figura 14, el enfoque es el mismo que en la figura 13 pero con un umbral de calidad  $P_s \geq 0.8$ . El EKM se representa en función de la cantidad total de usuarios, lo que permite evaluar la calidad del servicio en condiciones en las que el servicio se considera aceptable. Además, se nota que hay un mayor número total de Usuarios que logran un acceso exitoso en comparación con la Gráfica 15 cuando se establece el criterio de una probabilidad de acceso satisfactoria ( $P_s \geq 0.9$ ).

Esto indica que, al reducir ligeramente el umbral de calidad (de 0.9 a 0.8), un mayor número de usuarios experimentan una calidad de servicio aceptable en términos de la eficiencia en EKM. En otras palabras, la red es capaz de proporcionar un nivel de servicio satisfactorio a una población de usuarios más amplia bajo estas condiciones de  $P_s$ .

Esta observación sugiere que, en ciertas situaciones, es posible ajustar el umbral de  $P_s$  para ampliar la cobertura de usuarios que disfrutan de una calidad de servicio aceptable, lo que puede ser una decisión estratégica importante en el diseño y gestión de redes de comunicación.

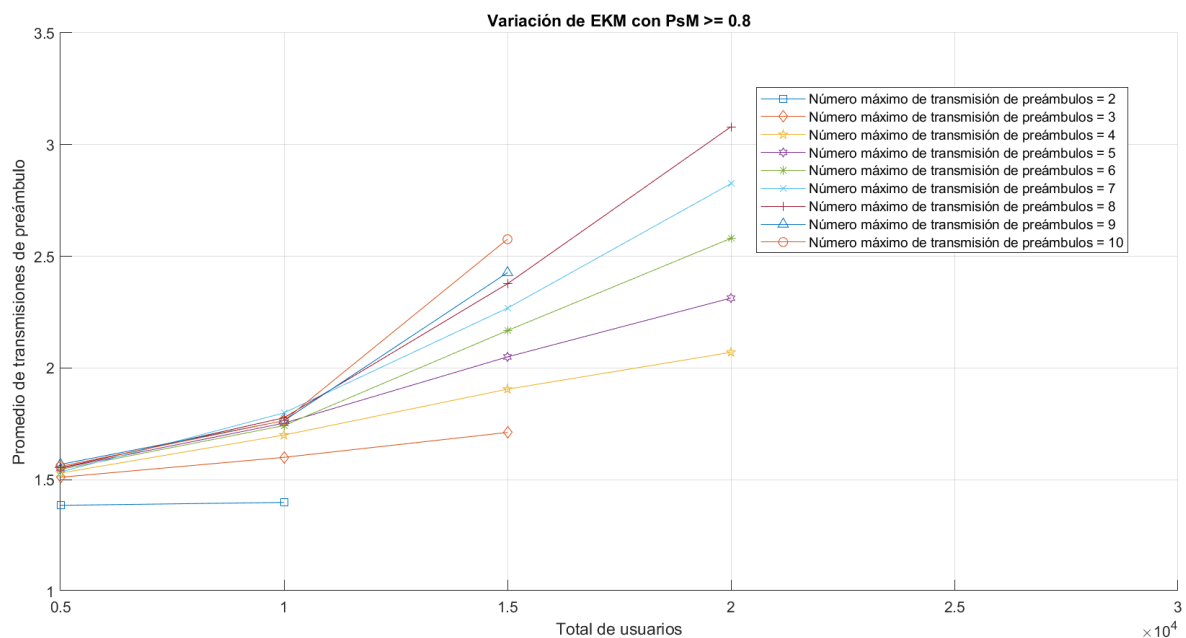


Figura 14 Número Medio de Transmisiones de Preámbulo en función de QoS de  $P_s \geq 0.80$

Fuente: [Autor]



### **1.7.5 Resultados del número máximo de transmisiones de preámbulo en función a la calidad de servicio.**

#### **Escenario 5**

En la figura 15, se puede observar que los resultados se limitan a aquellos en los que la Probabilidad de Acceso Satisfactorio es mayor o igual a 0.9. Esto indica un umbral elevado de calidad de servicio.

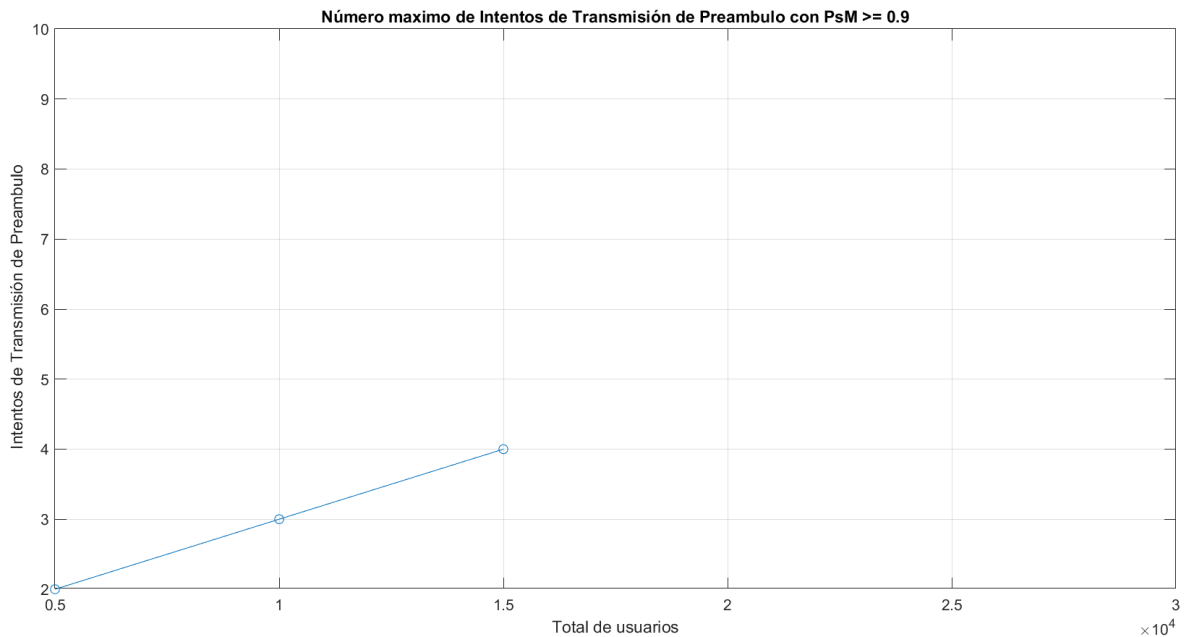
Para 5000 usuarios, se puede observar que los valores de intentos de transmisión de preámbulos a partir de 2 y superiores logran mantener una calidad de servicio del 90% o superior. Esto sugiere una eficiencia en el acceso a la red incluso con una cantidad moderada de usuarios.

Cuando se aumenta la cantidad de usuarios a 10000, se requiere un valor mínimo de 3 intentos de transmisión de preámbulo para mantener una calidad de servicio del 90% o superior. Esto indica que, con un mayor tráfico de usuarios, se deben realizar al menos 3 intentos de transmisión de preámbulo.

Para 15000 usuarios, la calidad de servicio del 90% o superior se mantiene cuando se utilizan 4 o más intentos de transmisión de preámbulo, lo que resalta la importancia de la optimización de esta variable en entornos de alta densidad de usuarios.

Este resultado indica que el 43% de los 30000 usuarios del tráfico masivo obtuvieron una respuesta satisfactoria en la secuencia del preámbulo durante la ventana de respuesta. Esto significa que la transmisión fue exitosa y se cumplió con los criterios de QoS establecidos para estos UEs.

Sin embargo, el 57% del tráfico experimentó un fallo en el acceso al RACH, lo que resultó en una probabilidad de acceso satisfactorio menor a 0.90.



*Figura 15 Número máximo de transmisiones de preámbulos en función de la cantidad de Usuarios con QoS de  $P_s \geq 0.90$*

*Fuente; [Autor]*

Además de evaluar el rendimiento cuando  $P_s$  es mayor o igual a 90, también se llevaron a cabo pruebas cuando  $P_s$  alcanza un umbral de mayor flexibilidad, mayor o igual a 0.80 (figura 16). Estas pruebas permitieron una comparación detallada de cómo la calidad de servicio (QoS) se comporta en ambos escenarios.

Para 5000 usuarios, se puede observar que los valores de intentos de transmisión de preámbulo de 2 en adelante logran mantener una calidad de servicio del 80% o superior. Esto indica que incluso con una cantidad moderada de usuarios, es posible alcanzar un nivel aceptable de calidad de servicio.

Cuando se aumenta la cantidad de usuarios a 10000, se requiere un valor mínimo de 2 para intentos de transmisión de preámbulo para mantener una calidad de servicio del 80% o superior. Esto sugiere que, con un tráfico más denso, se pueden lograr niveles aceptables de calidad de servicio con menos intentos de transmisión de preámbulo en comparación con el umbral de  $P_s \geq 90$ .

Para 15000 usuarios, se observa que una calidad de servicio del 80% o superior se mantiene a partir de 3 intentos de transmisión de preámbulo. Esto indica la importancia de optimizar esta variable en entornos con mayor densidad de usuarios.

En comparación con la evaluación con un umbral de Ps a 90, donde se lograba una calidad de servicio del 90% solo hasta 15000 usuarios, en este caso se puede observar que, para 20000 usuarios, una calidad de servicio del 80% se obtiene a partir de 4 intentos de transmisión de preámbulo, excepto cuando se utiliza un valor de 10, que parece afectar negativamente la calidad de servicio en esta configuración específica.

Este resultado indica que el 60% de los 30000 usuarios del tráfico masivo obtuvieron una respuesta satisfactoria en la secuencia del preámbulo durante la ventana de respuesta.

Estas descripciones resaltan los valores de Ps necesarios para mantener una calidad de servicio del 80% en función de la cantidad de usuarios y los intentos de transmisión de preámbulo, además de comparar estos resultados con los de la evaluación de  $Ps \geq 0.90$ .

Al analizar los resultados en ambas configuraciones, se pudieron identificar diferencias significativas en términos de la eficiencia del acceso a la red. Esto proporcionó información valiosa sobre cómo se ven afectados los niveles de QoS en función de umbrales de Ps más flexibles, lo que es fundamental para la optimización de la red en diferentes contextos y densidades de usuarios.

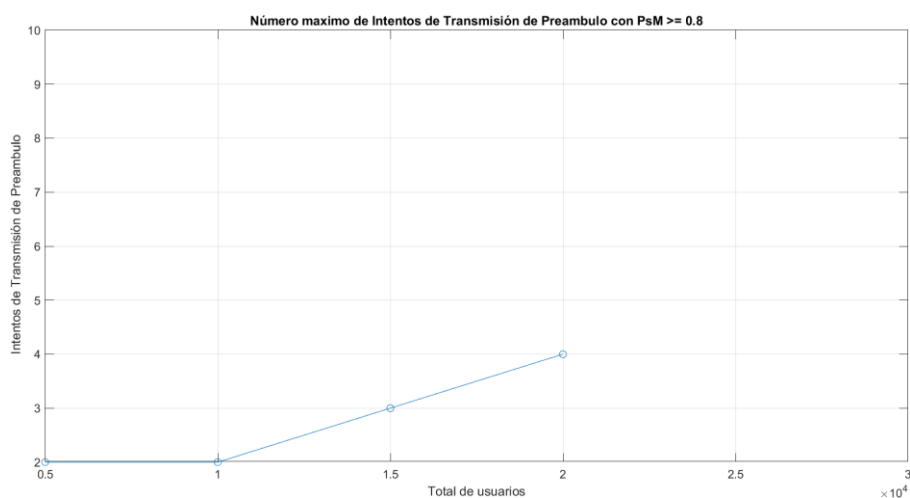


Figura 16 Número máximo de transmisiones de preámbulos en función de la cantidad de Usuarios con QoS de  $Ps \geq 0.80$

Fuente: [Autor]

### Escenario final

Tras realizar un análisis exhaustivo de los resultados derivados de los diversos escenarios que presentan cargas de tráfico masivos, considerando cantidades de transmisiones de preámbulos que varían de 2 a 10 y aplicando diversas métricas de rendimiento, se determina que la probabilidad de acceso satisfactorio alcanza su punto más alto cuando se emplean valores máximos de transmisiones de preámbulos de 4 y 5. Este descubrimiento es respaldado por una simulación implementada en Matlab (Figura 17). Estos hallazgos sugieren una tendencia significativa hacia una mayor eficacia en el acceso a la red cuando se utiliza un número específico de transmisiones de preámbulos, particularmente en el rango mencionado.

Además, tras realizar diversas simulaciones a partir del escenario base y basándonos en los resultados obtenidos en toda la investigación, se identifica un punto óptimo de probabilidad de acceso satisfactorio. Este punto óptimo se logra al emplear una cantidad específica de transmisiones de preámbulos, representando un equilibrio crítico entre eficacia y eficiencia en el acceso a la red. Este descubrimiento refuerza la importancia de ajustar cuidadosamente la configuración de las transmisiones de preámbulos para optimizar el rendimiento del sistema en situaciones de tráfico variadas.

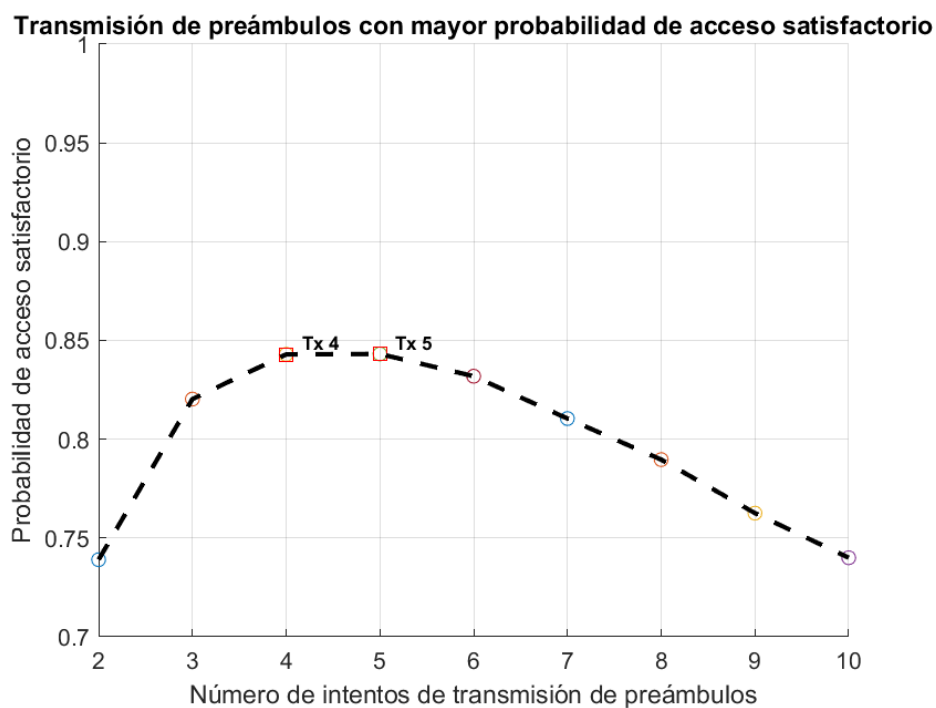


Figura 17 Probabilidad de acceso satisfactorio que alcanza su punto más alto

Fuente: [Autor]

## **Análisis estadístico**

### **Variable: probabilidad de acceso satisfactorio**

Se emplea un análisis de varianza (ANOVA) con el propósito de comparar las medias de la variable relacionada con la probabilidad de acceso satisfactorio. El objetivo principal es discernir la cantidad óptima de transmisiones de preámbulos que conlleva a una mayor probabilidad de acceso satisfactorio, especialmente en el contexto de una carga masiva de dispositivos que oscila entre 5000 y 30000.

### **Prueba de hipótesis**

#### **Hipótesis nula:**

$$H_0 \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6 = \mu_7 = \mu_8 = \mu_9 = \mu_{10}$$

#### **Promedios**

Los promedios de la variable probabilidad de acceso satisfactorio con respecto de rmax 2, rmax 3, rmax 4, rmax 5, rmax 6, rmax 7, rmax 8, rmax 9 y rmax 10 son significativamente iguales.

#### **Hipótesis alternativa:**

$$H_a \mu_j \neq \mu_k \quad j, k=2,3,4,5,6,7,8,9,10$$

#### **Promedios**

Los promedios de las variables son significativamente distintos

#### **Regla de decisión**

$P < 0.05$  rechazamos la  $H_0$  y se acepta la  $H_a$

$p \geq 0.05$  aceptamos la  $H_0$  y se rechaza la  $H_a$

## Análisis descriptivo de la variable Probabilidad de acceso satisfactorio

Tabla 4 Tabla de ANOVA con resultados de las mediciones de Probabilidad de acceso satisfactorio

ANOVA					
PROBA					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	.572	8	.072	1.742	.087
Dentro de grupos	15.161	369	.041		
Total	15.733	377			

El análisis realizado, específicamente mediante ANOVA arrojó un valor p de 0.087. Al aplicar la regla de decisión, se sugiere que dicho valor p puede interpretarse como evidencia que respalda la igualdad de todas las medias. Esta conclusión indica que no se observan diferencias significativas en el valor medio de la probabilidad de acceso satisfactorio entre las distintas cantidades de transmisiones de preámbulos evaluadas.

Aunque teóricamente se indique que las medias son iguales, hay una proporción de diferencia. Al aplicar el gráfico de medias (Figura 18) se puede observar que con una transmisión de preámbulos de 4 y 5 existe una mayor probabilidad de acceso satisfactorio en comparación con las otras transmisiones, estos resultados se pueden corroborar con resultados obtenidos en la simulación con el software Matlab (Figura 17).

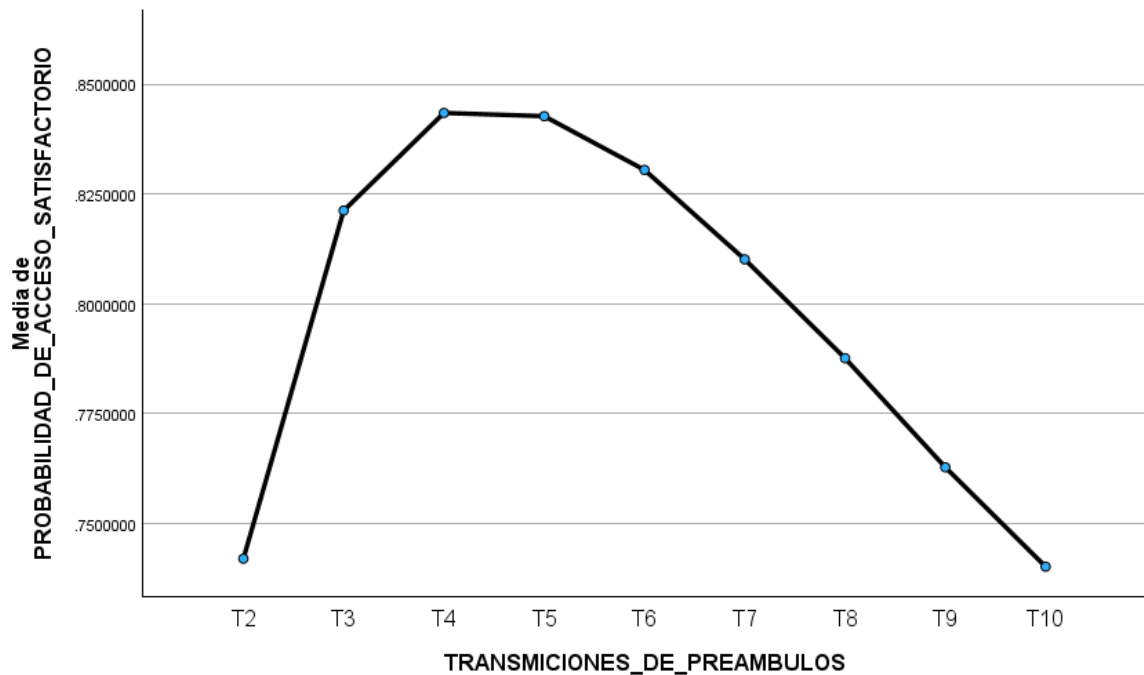


Figura 18 Grafico de medias de transmisión de preámbulos

Fuente: [Autor]

A continuación, se procede a correlacionar los valores que obtuvieron mayor probabilidad de acceso satisfactorio (T4, T5) para validar si hay una relación entre las dos variables.

Tabla 5 Tabla de correlación de transmisiones de preámbulo de valores de 4 y 5

Resumen de modelo y estimaciones de parámetro							
Variable dependiente: TRANSMISIÓN_DE_PREAMBULO_5							
Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de parámetro	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Lineal	.995	8765.676	1	40	<.001	-.087	1.103
La variable independiente es TRANSMISIÓN_DE_PREAMBULO_4.							

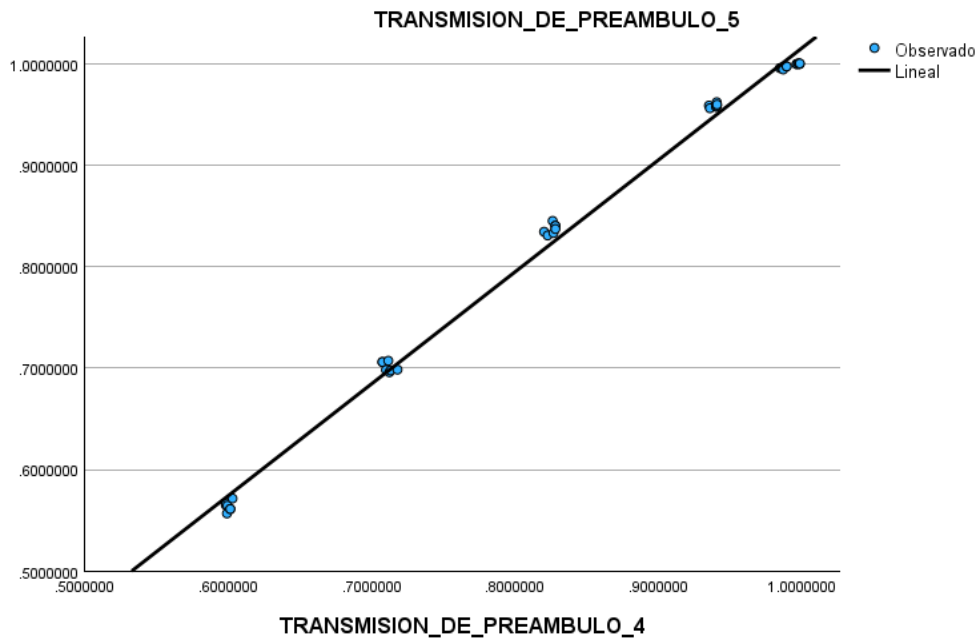


Figura 19 Correlación de transmisiones de preámbulo de valores de 4 y 5.

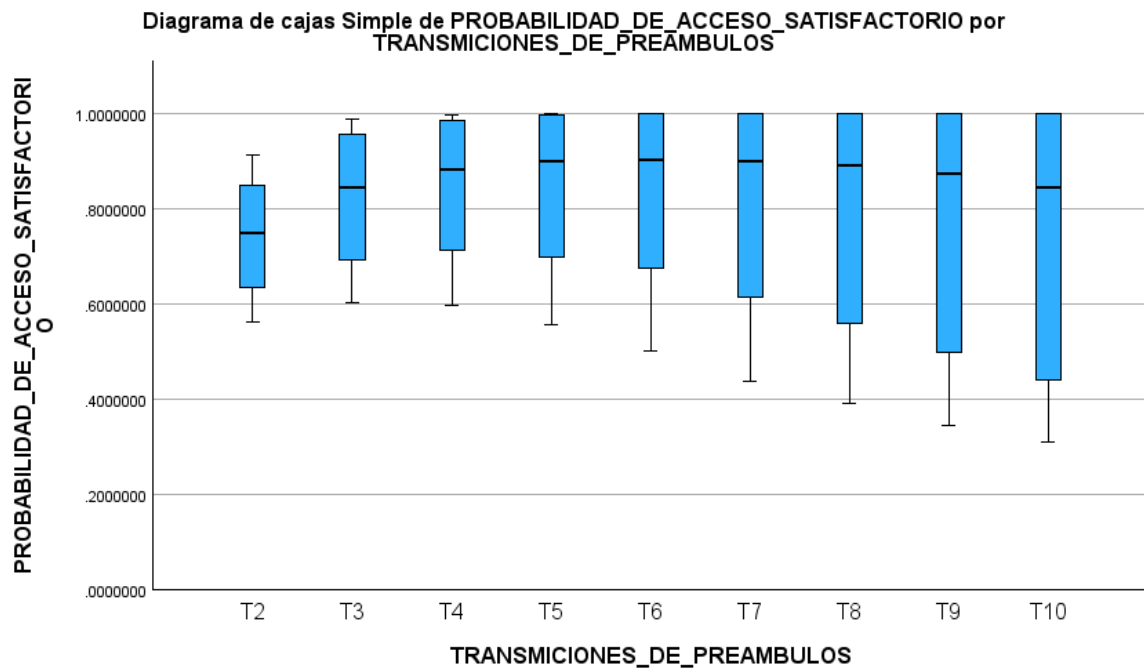
Fuente: [Autor]

En la tabla 5 y la gráfica 19, se puede observar que los valores de transiciones de preámbulos 4 y 5 tienen un alto valor de correlación debido a que estos valores tienen la mayor probabilidad de acceso satisfactorio.

A continuación, se realiza un diagrama de cajas (Figura 20), donde se evalúan las transmisiones de preámbulos en el eje x y la probabilidad de acceso satisfactorio en el eje y. Este gráfico proporciona una representación visual de la distribución y dispersión de la probabilidad de acceso satisfactorio en relación con las diferentes cantidades de transmisiones de preámbulos.

Cada caja en el diagrama representa un rango intercuartílico, proporcionando una indicación visual de la variabilidad en la probabilidad de acceso satisfactorio para cada cantidad de transmisiones de preámbulos. Las líneas horizontales dentro de las cajas representan las medianas, ofreciendo una referencia para la tendencia central de los datos.





*Figura 20 Diagrama de cajas de transmisiones de preámbulos*

*Fuente: [Autor]*

En este punto de la investigación, se procede a examinar las diferencias estadísticas en las transmisiones de preámbulos que obtuvieron mayor probabilidad de acceso satisfactorio (T4, T5), se aplica la prueba de Tukey (HSD) para realizar comparaciones múltiples de medias con el fin de obtener una comprensión más profunda de las diferencias entre los grupos, y se realiza una gráfica de medias en función de los usuarios establecidos.

En las tablas 6 y 7 la prueba de Tukey permite observar que grupos son específicos entre sí y encontrar dónde se encuentran las diferencias significativas para una cantidad de transmisiones de preámbulos de 4 y 5.

Las figuras 21 y 22 indican que, con una cantidad de 5000 dispositivos para transmisiones de preámbulo de 4 y 5, la probabilidad de acceso satisfactorio es suficientemente alta. Sin embargo, a medida que la cantidad de usuarios continúa aumentando, se observa una disminución en la probabilidad de acceso satisfactorio.

Estos resultados gráficos corroboran las conclusiones extraídas de las simulaciones realizadas con MATLAB.

Tabla 6 Prueba de Tukey con un valor de transmisión de preámbulo de 4

TRANSMISIÓN DE PREÁMBULO 4							
HSD Tukey <sup>a</sup>							
cantidad de usuarios	N	Subconjunto para alfa = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
30000	7	.60013 3136					
25000	7		.71138 9051				
20000	7			.82565 7328			
15000	7				.93895 4929		
10000	7					.98698 4378	
5000	7						.997496 172
<b>Sig.</b>		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 7.000.

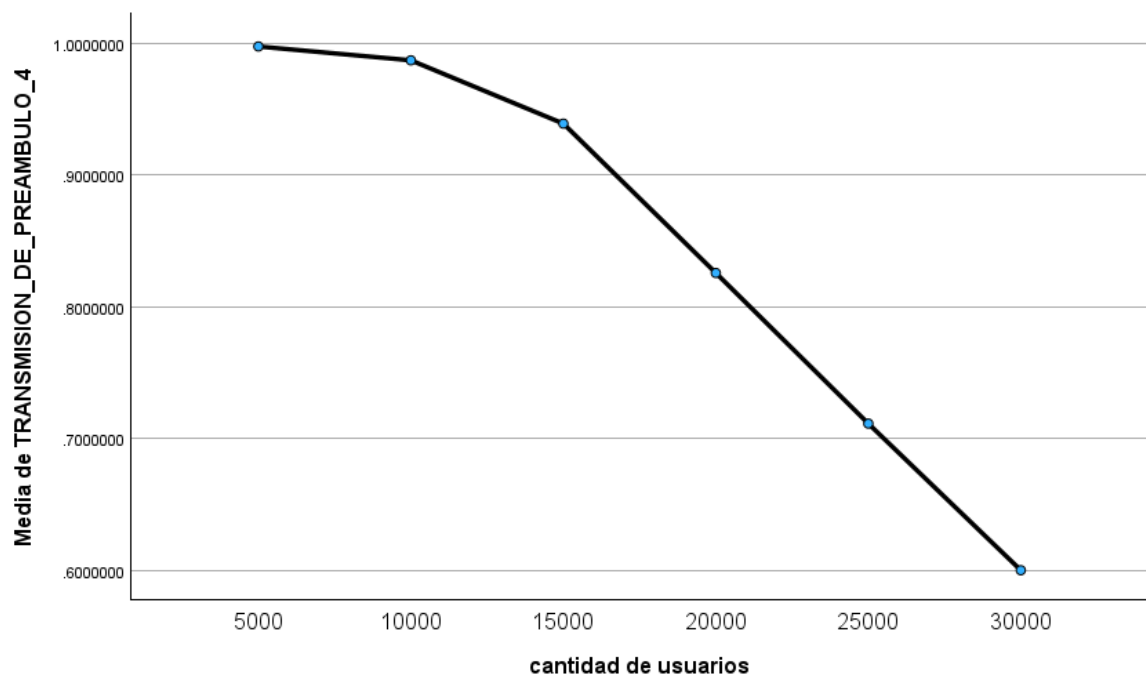
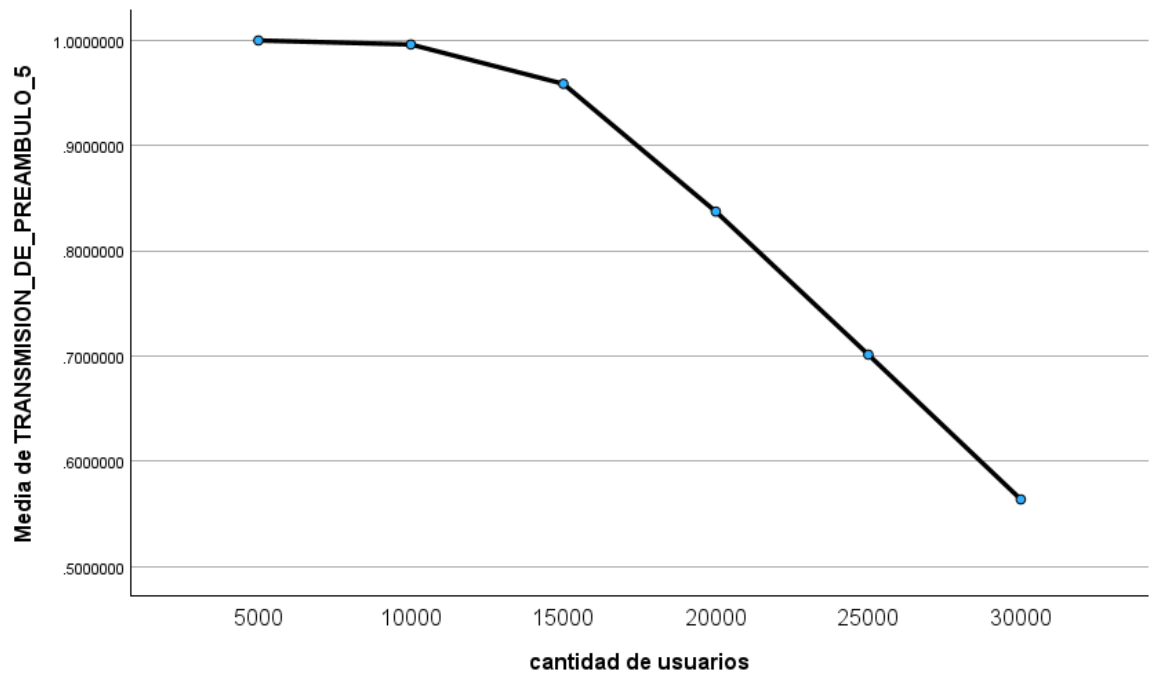


Figura 21 Media de probabilidad de acceso satisfactorio para un valor de transmisión de preámbulo de 4

Fuente: [Autor]

Tabla 7 Prueba de Tukey con un valor de transmisión de preámbulo de 5

<b>TRANSMISIÓN DE PREÁMBULO 5</b>						
<b>HSD Tukey<sup>a</sup></b>						
<b>cantidad de usuarios</b>	<b>N</b>	<b>Subconjunto para alfa = 0.05</b>				
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>30000</b>	7	.563814 646				
<b>25000</b>	7		.701296 992			
<b>20000</b>	7			.837128 234		
<b>15000</b>	7				.958481 176	
<b>10000</b>	7					.995837 665
<b>5000</b>	7					.999658 418
<b>Sig.</b>		1.000	1.000	1.000	1.000	.347
Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.						
a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 7.000.						



*Figura 22 Media de probabilidad de acceso satisfactorio para un valor de transmisión de preámbulo de 4*

*Fuente: [Autor]*

## CAPITULO V

### 1.8 Conclusiones

En virtud de la presente investigación, se ha corroborado de manera concluyente que la modificación estratégica del número de transmisiones de preámbulos ejerce una influencia notable en la probabilidad de lograr un acceso satisfactorio en el ámbito de despliegues de comunicaciones masivas IoT. Este hallazgo destaca la relevancia crítica de la optimización de dicho parámetro como componente fundamental para mejorar la eficacia operativa en entornos IoT, caracterizados por una densidad considerable de dispositivos y una demanda variada de tráfico.

La elección de un número de transmisión de preámbulo adecuado requiere un equilibrio meticuloso, dado que un número excesivo de intentos podría llevar a una saturación del canal y, como consecuencia, a una disminución del acceso satisfactorio. Es de vital importancia encontrar un equilibrio adecuado que permita maximizar la probabilidad de éxito satisfactorio en la transmisión del preámbulo sin comprometer la capacidad y la eficiencia del canal.

En escenarios de baja congestión, la posibilidad de aumentar los intentos de transmisión de preámbulo puede ser ventajosa para asegurar un acceso más satisfactorio. No obstante, es crucial tener en consideración la búsqueda de un equilibrio óptimo, ya que un exceso de intentos podría generar problemas innecesarios.

A medida que la carga de usuarios se incrementa, se observa una disminución de probabilidad de acceso satisfactorio. Este fenómeno puede atribuirse a una competencia más intensa por recursos limitados, lo que conlleva a un aumento de colisiones y, a una reducción en la eficiencia del acceso. La reducción de probabilidad de acceso satisfactorio sugiere la necesidad de implementar estrategias adicionales para gestionar y mitigar el impacto de la carga creciente en el sistema.

La reducción del umbral de probabilidad de acceso satisfactorio de 90% a 80%, se presenta como una estrategia viable para ampliar la cobertura de usuarios manteniendo una calidad

de servicio aceptable, siempre y cuando se logre un equilibrio adecuado para evitar una degradación significativa en la calidad de servicio ofrecida.

Después de llevar a cabo la prueba estadística, se puede concluir que existe una probabilidad significativamente mayor de acceso satisfactorio cuando se utilizan valores de transmisión de preámbulos de 4 y 5. Estos hallazgos sugieren que estas cantidades específicas de transmisiones de preámbulos están asociadas con una mejora notable en la probabilidad de acceso satisfactorio en comparación con otras cantidades evaluadas.

## **1.9 Recomendaciones**

Se recomienda implementar una simulación que permitan un ajuste dinámico del número de transmisiones de preámbulos en función de las condiciones cambiantes del entorno. Esto permitirá una adaptación continua para optimizar el acceso satisfactorio, especialmente en situaciones de congestión.

Se recomienda dedicar especial atención al momento de colocar un valor de transmisión de preámbulo, especialmente en entorno de tráfico masivo. En situaciones donde la congestión de usuarios es elevada, ajustar adecuadamente un valor de preámbulo puede contribuir significativamente a minimizar colisiones y mejorar el rendimiento general del sistema.

Dada la evolución constante de la tecnología IoT se recomienda realizar investigaciones de rendimiento a largo plazo para comprender mejor cómo evoluciona el rendimiento de la red con cambios en la densidad de dispositivos IoT y la carga de tráfico. Esto ayudará a identificar patrones y tendencias a lo largo del tiempo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Zaheer and S. Khan, “Future Internet: The Internet of Things Architecture, Possible Applications and Key Challenges,” pp. 257–260, 2012, doi: 10.1109/FIT.2012.53.
- [2] L. Y. Zeng, “A security framework for internet of things based on 4G communication,” *Proceedings of 2nd International Conference on Computer Science and Network Technology, ICCSNT 2012*, pp. 1715–1718, 2012, doi: 10.1109/ICCSNT.2012.6526251.
- [3] T. Rajora, L. Sejwal, and N. Tyagi, “Leading edge in the world of wireless communication: 5G,” *AIP Conf Proc*, vol. 2481, no. 1, p. 030005, Nov. 2022, doi: 10.1063/5.0105396.
- [4] N. Jiang, Y. Deng, X. Kang, and A. Nallanathan, “A New Spatio-Temporal Model for Random Access in Massive IoT Networks,” vol. 2018, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1109/GLOCOM.2017.8254947.
- [5] “LA SOCIEDAD EN LA RED.” Accessed: Jan. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.ontsi.es/sites/ontsi/files/2020-11/InformeAnualLaSociedadEnRed2019Ed2020.pdf>
- [6] “TATA COMMUNICATIONS.” Accessed: Jan. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.tatacommunications.com/solutions/mobility-iot/cellular-iot-enablement/>
- [7] Belén Bini Bernadou, “What is Cellular IoT (Internet of Things)? – Freeway.” Accessed: Jan. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.freeway.com/what-is-cellular-iot-internet-of-things/>
- [8] M. Singh and G. Baranwal, “Quality of Service (QoS) in Internet of Things,” in *Proceedings - 2018 3rd International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages, IoT-SIU 2018*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Nov. 2018. doi: 10.1109/IoT-SIU.2018.8519862.
- [9] “Massive IoT – How 5G Networks are evolving the future of IoT for business | Rogers.” Accessed: Jan. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.rogers.com/business/blog/en/understanding-massive-iot-and-why-it-matters-for-your-business>
- [10] D. Santander K. Cicienia F. Astudillo J Aranda, “Vista de Impacto del tiempo de backoff en el rendimiento de IoT celular en entornos de comunicación masiva.” Accessed: Jan. 04, 2023. [Online]. Available: <https://novasinerгия.unach.edu.ec/index.php/novasinerгия/article/view/318/280>
- [11] Santiago Israel Castro López, “ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN MECANISMO DE CONTROL DE CONGESTIÓN EN LA TECNOLOGÍA NB-IoT PARA DESPLIEGUES

DE COMUNICACIÓN MASIVA DE INTERNET DE LAS COSAS.” Accessed: Jan. 04, 2023. [Online]. Available:

<http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/8655/1/Castro%20L%C3%B3pez%20S.%282022%29%20An%C3%A1lisis%20y%20dise%C3%B1o%20de%20un%20mecanismo%20de%20control%20de%20congesti%C3%B3n%20en%20la%20tecnolog%C3%ADa%20NB-IOT%20para%20despliegues%20de%20Comunicaci%C3%B3n%20Masiva%20de%20Internet%20de%20las%20Cosas%20%28Tesis%20de%20g.pdf>

- [12] M. Shirvanimoghaddam, M. Dohler, and S. Johnson, “Massive Non-Orthogonal Multiple Access for Cellular IoT: Potentials and Limitations,” Dec. 2016, doi: 10.1109/MCOM.2016.1600618.
- [13] Daniel Alejandro Santander González, “Evaluación y caracterización del impacto del tiempo de backoff en la red de acceso radio de iot celular con tráfico masivo.” Accessed: Jan. 04, 2023. [Online]. Available: <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/8136/1/Santander%20G.%2C%20Daniel%20A.%20%282021%29%20-%20Evaluaci%C3%B3n%20y%20caracterizaci%C3%B3n%20del%20impacto%20del%20tiempo%20de%20backoff%20en%20la%20red%20de%20acceso%20radio%20de%20IoT%20celular%20con%20tr%C3%A1fico%20masivo.pdf>
- [14] D. Santander *et al.*, “Impact of backoff time on cellular IoT performance in massive communication environments,” *Revista Digital Novasinerzia*, vol. 5, no. 1, pp. 17–30, Jan. 2022, doi: 10.37135/NS.01.09.02.
- [15] L. Tello-Oquendo *et al.*, “Performance Analysis and Optimal Access Class Barring Parameter Configuration in LTE-A Networks with Massive M2M Traffic,” *IEEE Trans Veh Technol*, vol. XX, p. 1, 2017, doi: 10.1109/TVT.2017.2776868.
- [16] J. R. Vidal, L. Tello-Oquendo, V. Pla, and L. Guijarro, “Performance Study and Enhancement of Access Barring for Massive Machine-Type Communications,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 63745–63759, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2917618.
- [17] L. T. Oquendo, V. Pla, L. Tello-Oquendo, I. Leyva-Mayorga, J. Martinez-Bauset, and V. Casares-Giner, “Approximate analysis of wireless systems based on time-scale decomposition Gestion de la Cyberseguridad View project Modeling and simulation of vertical handover View project Analysis of LTE-A Random Access Procedure: A Foundation to Propose Mechanisms for Managing the M2M Massive Access in Wireless Cellular Networks”, doi: 10.1109/WD.2013.6686513.



- [18] I. Kadota and E. Modiano, “Minimizing the Age of Information in Wireless Networks with Stochastic Arrivals,” vol. 10, 2019, doi: 10.1145/3323679.3326520.
- [19] E. Esime Zacatenco, “INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECÁNICA Y ‘COMUNICACIÓN MÁQUINA A MÁQUINA PARA LA RED LTE’ TESIS.”
- [20] C. López Pujota and S. Sinche Maita, “Simulación de un sistema de comunicaciones utilizando la tecnología BN-IoT (Narrow Band–Internet of Things),” *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información*, vol. 10, no. 21, pp. 71–87, Sep. 2022, doi: 10.36825/riti.10.21.007.

## ANEXOS