

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE ELECTRÓNICA
Y TELECOMUNICACIONES

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

TRABAJO DE TITULACIÓN

**ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DEL CANAL DE ACCESO ALEATORIO EN LA
TECNOLOGÍA NARROWBAND IoT (NB-IoT) PARA LA COMUNICACIÓN
MÁQUINA A MÁQUINA (M2M)**

Autor:

Paola Inés Satán Satán

Tutor:

PhD. Luis Patricio Tello Oquendo

Riobamba – Ecuador

Año 2020

Los miembros del tribunal de graduación del proyecto de investigación de título: **ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DEL CANAL DE ACCESO ALEATORIO EN LA TECNOLOGÍA NARROWBAND IoT (NB-IoT) PARA LA COMUNICACIÓN MÁQUINA A MÁQUINA**, presentado por: **Paola Inés Satán Satán**, dirigida por **Luis Patricio Tello Oquendo, PhD**.

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

Para constancia de lo expuesto firma

Mgs. Deysi Inca

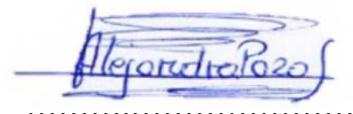
Presidente del Tribunal



Firma

Ing. Alejandra Pozo

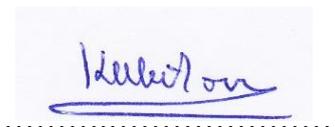
Miembro del Tribunal



Firma

Dr. Klever Torres

Miembro del Tribunal



Firma

DECLARACIÓN EXPRESA DE TUTORÍA

En calidad de tutor del tema de investigación: **ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DEL CANAL DE ACCESO ALEATORIO EN LA TECNOLOGÍA NARROWBAND IoT (NB-IoT) PARA LA COMUNICACIÓN MÁQUINA A MÁQUINA (M2M)**, realizado por la Srta. **Paola Inés Satán Satán**, para optar por el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, considero que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sustentada públicamente y evaluada por el jurado examinador que se designe.

Riobamba, 26 de noviembre de 2020



.....
Luis P. Tello Oquendo, PhD.

C.I 060423524-2

TUTOR

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La responsabilidad del contenido de este proyecto de graduación corresponde exclusivamente a **Paola Inés Satán Satán, Luis P. Tello Oquendo, PhD.** y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional de Chimborazo.



Paola Inés Satán Satán

C.I. 060411123-7

DEDICATORIA

Que nada sea una limitante para llegar a la meta que has venido trabajando con amor, esfuerzo y entusiasmo.

Este proyecto lo dedico al único y sabio Dios, quien me dio sabiduría e inteligencia en el camino de la ciencia y el saber, y por él ha sido posible desarrollar este proyecto de investigación.

A mis queridos padres, quienes tomaron la decisión firme de darme la herencia de un estudio profesional, acompañado de amor, esfuerzo, trabajo y apoyo incondicional.

A mi hermano y hermanas, pilares esenciales en el transitar de mi camino y sin ellos tampoco lo hubiera logrado, porque cada palabra de apoyo y ocurrencia hicieron que tenga sentido vivir un día a la vez.

Con amor, Paola.

AGRADECIMIENTO

Le agradezco al autor de la vida, nuestro Señor Jesucristo, por ser mi todo en el transcurso de mi carrera profesional y por permitirme vivir este sueño tan anhelado junto a mi familia.

A mi amada familia, por ser incondicionales en todo momento y tiempo, quienes me brindaron su amor, esfuerzo, apoyo y palabras de fortaleza en momentos de dificultad. Ellos son el reflejo vivo de superación, valentía y unión familiar.

A mi estimado tutor, PhD. Luis Patricio Tello O., gracias por creer en mí, por brindarme su orientación, asesoría, apoyo, tiempo y espacio para desarrollar el proyecto de investigación con calidad y eficacia.

A mis docentes, quienes impartieron sus valiosos conocimientos y experiencias durante mi formación profesional, gracias, estimados profesores por su dedicación, apoyo, paciencia e interés para una formación académica con excelencia.

A mis amigos y compañeros, por su amistad y apoyo durante mi trayectoria universitaria, con quienes compartí experiencias únicas que marcaron mi mente y mi corazón.

A mi gran amigo Henry Zambrano, por su apoyo incondicional en todas las áreas de mi vida, porque peleaste junto a mi muchas de mis batallas para salir en victoria.

Paola.

INDICE GENERAL

| | |
|--|-------------|
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | VIII |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | X |
| RESUMEN..... | XI |
| ABSTRACT..... | XII |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO I..... | 3 |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 3 |
| 1.1. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN..... | 3 |
| 1.2. OBJETIVOS | 4 |
| 1.2.1. OBJETIVO GENERAL..... | 4 |
| 1.2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO | 4 |
| CAPÍTULO II. | 5 |
| 2. ESTADO DEL ARTE..... | 5 |
| 2.1. ANTECEDENTES | 5 |
| 2.2. SISTEMA DE COMUNICACIÓN MACHINE TO MACHINE (M2M) | 6 |
| 2.3. TECNOLOGÍA NARROWBAND INTERNET OF THINGS | 7 |
| 2.3.1. CARACTERÍSTICAS | 7 |
| 2.3.2. MODOS DE OPERACIÓN | 7 |
| 2.3.3. ESTRUCTURA DE TRAMA..... | 8 |
| 2.3.4. COBERTURA MEJORADA | 9 |
| 2.3.5. PROCEDIMIENTO DE ACCESO ALEATORIO | 10 |
| CAPÍTULO III..... | 13 |
| 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN..... | 13 |
| 3.1. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN..... | 13 |
| 3.1.1. INVESTIGACIÓN EXPLORATORIA..... | 13 |
| 3.2. MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN..... | 13 |
| 3.2.1. MÉTODO CIENTÍFICO | 13 |
| 3.2.2. TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS. | 13 |
| 3.2.3. INSTRUMENTOS..... | 14 |
| 3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA..... | 14 |
| 3.3.1. POBLACIÓN..... | 14 |
| 3.3.2. MUESTRA | 14 |

| | | |
|--------------------------|---|-----------|
| 3.4. | OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES..... | 14 |
| 3.5. | PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS..... | 15 |
| 3.5.1. | Diagrama secuencial del procedimiento de acceso aleatorio..... | 16 |
| 3.5.2. | Mensaje 1: Preámbulo de acceso aleatorio..... | 17 |
| 3.5.2.1. | Niveles de Cobertura mejorada..... | 17 |
| 3.5.3. | Mensaje 2: Respuesta de acceso aleatorio..... | 18 |
| 3.5.4. | Mensaje 3: Petición de conexión..... | 19 |
| 3.5.5. | Mensaje 4: Resolución de contienda..... | 20 |
| 3.6. | Indicadores clave de rendimiento..... | 21 |
| 3.6.1. | Probabilidad de acceso satisfactorio..... | 21 |
| 3.6.2. | Retardo de acceso..... | 23 |
| CAPÍTULO IV..... | | 25 |
| 4. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 25 |
| 4.1. | ESCENARIO DE RED..... | 25 |
| 4.2. | MODELO DE TRANSMISIÓN NB-IOT..... | 25 |
| 4.3. | CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS..... | 27 |
| 4.4. | RENDIMIENTO DEL RACH..... | 28 |
| 4.4.1. | PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO..... | 28 |
| 4.4.1.1. | PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO EN r_{max} | 28 |
| 4.4.1.2. | PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO EN LAS SUBPORTADORAS..... | 31 |
| 4.4.2. | RETARDO PROMEDIO EN EL ACCESO..... | 35 |
| 4.4.2.1. | RETARDO PROMEDIO EN EL ACCESO PARA NÚMERO DE INTENTOS DEL PREÁMBULO..... | 35 |
| 4.4.2.2. | RETARDO PROMEDIO EN EL ACCESO PARA..... | 39 |
| CAPÍTULO V..... | | 42 |
| 5. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONESCONCLUSIONES..... | 42 |
| 5.1. | CONCLUSIONES..... | 42 |
| 5.2. | RECOMENDACIONES..... | 43 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | | 44 |
| ANEXOS..... | | 46 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1 . MODELO DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN M2M | 6 |
| FIGURA 2. MODOS DE OPERACIÓN NB-IoT | 8 |
| FIGURA 3. ESTRUCTURA DE TRAMA PARA NB-IoT PARA EL ESPACIO DE SUBPORTADORAS DE 15kHz. | 9 |
| FIGURA 4. NIVELES DE CE Y REPETICIONES. | 10 |
| FIGURA 5. PROCEDIMIENTO DE ACCESO ALEATORIO PARA NB-IoT | 10 |
| FIGURA 6. PROCEDIMIENTO PARA ANÁLISIS Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS..... | 16 |
| FIGURA 7. PROCEDIMIENTO DE ACCESO ALEATORIO PARA NB-IoT. | 17 |
| FIGURA 8. SECUENCIA DE TRANSMISIÓN PARA CADA NIVEL CE | 18 |
| FIGURA 9. PROCEDIMIENTO DEL MSG2 | 19 |
| FIGURA 10. PROCESO DEL MSG 3 DEL PROCEDIMIENTO DE ACCESO ALEATORIO | 20 |
| FIGURA 11. PROCEDIMIENTO DE ACCESO ALEATORIO PARA EL MSG 4 | 21 |
| FIGURA 12. PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO (Ps) EN FUNCIÓN DE DIFERENTES DEMANDAS DE TRÁFICO M2M ACTIVOS Y VALORES DE NUM.SUBCARRIERS ESTABLECIDOS EN (N=12, N=24, N=36 Y N=48) PARA DIFERENTES VALORES DE NÚMERO MÁXIMO DE INTENTOS DE TRANSMISIÓN DEL PREÁMBULO (RMAX)..... | 28 |
| FIGURA 13. PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO (Ps) EN FUNCIÓN DE DIFERENTES DEMANDAS DE TRÁFICO M2M ACTIVOS CON NÚMERO DE INTENTOS MÁXIMOS (RMAX), PARA DIFERENTES VALORES DE SUBPORTADORAS (NUM.SUBCARRIERS) ESTABLECIDOS EN (N=12, N=24, N=36 Y N=48)..... | 31 |
| FIGURA 14. PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO (Ps) EN FUNCIÓN DE DIFERENTES DEMANDAS DE TRÁFICO M2M ACTIVOS CON DIFERENTES VALORES DE INTENTOS DEL PREÁMBULO (RMAX) PARA VALORES DE NUM.SUBCARRIERS ESTABLECIDOS EN (N=12, N=24, N=36 Y N=48). | 34 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 15. RETARDO PROMEDIO $E[D](s)$ EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE UES PARA DIFERENTES VALORES DE R_{MAX} Y NÚMERO DE SUBPORTADORAS. | 36 |
| FIGURA 16. RETARDO PROMEDIO EN FUNCIÓN DE USUARIOS PARA DIFERENTES VALORES DE INTENTOS EN EL PREÁMBULO ($R_{MAX} = 7$ Y $R_{MAX}=10$) Y NÚMERO DE SUBPORTADORAS..... | 39 |
| FIGURA 17. RETARDO PROMEDIO EN FUNCIÓN DE NÚMERO DE USUARIOS, NÚMERO MÁXIMO DE TRANSMISIONES DE PREÁMBULO Y NÚMERO DE SUBCARRIERS..... | 40 |
| FIGURA 18. PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO (P_s) EN FUNCIÓN DE DIFERENTES DEMANDAS DE TRÁFICO M2M ACTIVOS CON NÚMERO DE INTENTOS MÁXIMOS ($R_{MAX}=1$), PARA DIFERENTES VALORES DE SUBPORTADORAS (NUM.SUBCARRIERS) ESTABLECIDOS EN ($N=12$, $N=24$, $N=36$ Y $N=48$)..... | 47 |
| FIGURA 19. PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO (P_s) EN FUNCIÓN DE DIFERENTES DEMANDAS DE TRÁFICO M2M ACTIVOS CON NÚMERO DE INTENTOS MÁXIMOS ($R_{MAX}=4$), PARA DIFERENTES VALORES DE SUBPORTADORAS (NUM.SUBCARRIERS) ESTABLECIDOS EN ($N=12$, $N=24$, $N=36$ Y $N=48$). | 47 |
| FIGURA 20. RETARDO PROMEDIO EN FUNCIÓN DE VARIOS USUARIOS UES PARA DIFERENTES VALORES $R_{MAX}=2$ Y DIFERENTES VALORES DE SUBPORTADORAS (NUM.SUBCARRIERS) ESTABLECIDOS EN ($N=12$, $N=24$, $N=36$ Y $N=48$). | 48 |
| FIGURA 21. RETARDO PROMEDIO EN FUNCIÓN DE VARIOS USUARIOS UES PARA DIFERENTES VALORES $R_{MAX}= 5$ Y DIFERENTES VALORES DE SUBPORTADORAS (NUM.SUBCARRIERS) ESTABLECIDOS EN ($N=12$, $N=24$, $N=36$ Y $N=48$). | 48 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| TABLA 1. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES | 15 |
| TABLA 2. RESUMEN DE LOS CANALES FÍSICOS DE NB-IoT. | 27 |
| TABLA 3. PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO (Ps) EN $R_{MAX} = 3$, $R_{MAX} = 7$ Y $R_{MAX} = 10$, CON 12, 24, 36 Y 48 NUM.SUBCARRIER PARA 100 UES ACTIVOS. | 29 |
| TABLA 4. PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO (Ps) EN $R_{MAX} = 3$, $R_{MAX} = 7$ Y $R_{MAX} = 10$, CON 12, 24, 36 Y 48 NUM.SUBCARRIER PARA 50 UES ACTIVOS. | 29 |
| TABLA 5. PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO (Ps) EN $R_{MAX} = 3$, $R_{MAX} = 7$ Y $R_{MAX} = 10$, CON 12, 24, 36 Y 48 NUM.SUBCARRIER PARA 10 UES ACTIVOS..... | 30 |
| TABLA 6. PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO PARA SUBPORTADORAS ESTABLECIDOS (N=12, N=24, N=36 Y N=48) EN FUNCIÓN DE 100 UES ACTIVOS CON OPORTUNIDADES DE ACCESO MÁXIMO DEFINIDOS COMO $R_{MAX} = 3$, $R_{MAX} = 7$ Y $R_{MAX} = 10$ | 32 |
| TABLA 7. PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO PARA SUBPORTADORAS ESTABLECIDOS (N=12, N=24, N=36 Y N=48) EN FUNCIÓN DE 50 UES ACTIVOS CON OPORTUNIDADES DE ACCESO MÁXIMO DEFINIDOS COMO $R_{MAX} = 3$, $R_{MAX} = 7$ Y $R_{MAX} = 10$ | 32 |
| TABLA 8. PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO PARA SUBPORTADORAS ESTABLECIDOS (N=12, N=24, N=36 Y N=48) EN FUNCIÓN DE 10 UES ACTIVOS CON OPORTUNIDADES DE ACCESO MÁXIMO DEFINIDOS COMO $R_{MAX} = 3$, $R_{MAX} = 7$ Y $R_{MAX} = 10$ | 33 |
| TABLA 9. RETARDO PROMEDIO EN EL ACCESO $E[D](s)$ EN FUNCIÓN DE 10 UES ACTIVOS M2M Y 4 GRUPOS NUM.SUBCARRIERS PARA $R_{MAX} = 3$, $R_{MAX} = 7$ Y $R_{MAX} = 10$ | 37 |
| TABLA 10. RETARDO PROMEDIO EN EL ACCESO $E[D](s)$ EN FUNCIÓN DE 50 UES ACTIVOS M2M Y 4 GRUPOS NUM.SUBCARRIERS. PARA $R_{MAX}=3$, $R_{MAX}=7$ Y $R_{MAX}=10$ | 37 |
| TABLA 11. RETARDO PROMEDIO EN EL ACCESO $E[D](s)$ EN FUNCIÓN DE 100 UES ACTIVOS M2M Y 4 GRUPOS NUM.SUBCARRIERS. PARA $R_{MAX}=3$, $R_{MAX}=7$ Y $R_{MAX}=10$ | 38 |
| TABLA 12. COMPARATIVA DE ESCENARIOS CON INTERVALOS DE RESPUESTA ÓPTIMA..... | 41 |
| TABLA 13. RESUMEN DE LOS PARÁMETROS DE LOS CANALES FÍSICOS DE NB-IoT. | 46 |

RESUMEN

El despliegue a gran escala de las comunicaciones máquina a máquina (*Machine-to-machine*, M2M) genera varios desafíos en las redes de comunicación celular. Frente a estos retos, el organismo de estandarización *Third Generation Partnership Project* (3GPP) ha desarrollado la tecnología *Narrowband Internet of Things* (NB-IoT) como parte del *Release 13*. El objetivo de esta tecnología es ofrecer una conexión inalámbrica fiable bajo diferentes demandas de tráfico M2M con características peculiares. Dado que la mayor parte de transmisiones NB-IoT se realizan en el enlace ascendente, entonces, el canal de acceso aleatorio puede verse afectado y llegar a ser un cuello de botella en todo el sistema.

Este trabajo de investigación analiza las principales métricas que definen el rendimiento del canal de acceso aleatorio (*Random Access Channel*, RACH) en la tecnología NB-IoT bajo diferentes demandas de tráfico M2M. Para ello se desarrolló un modelo de simulación utilizando el software Matlab. Entre las principales métricas analizadas están la probabilidad de acceso satisfactorio, número de intentos del usuario para enviar el preámbulo, número de subportadoras que intervinieron en el acceso y el retardo promedio en el acceso. Entonces, de acuerdo con los datos registrados, se evaluó el rendimiento del RACH en la tecnología NB-IoT variando los diversos parámetros del sistema y tráfico M2M. Se identificaron las configuraciones adecuadas del RACH para lograr transmisiones fiables, es decir una probabilidad de acceso satisfactorio mayor al 90%. Con esto se pretende tener una visión clara del comportamiento del RACH bajo diversas condiciones de tráfico; esto servirá de base para el diseño de mecanismos de control de acceso para aliviar la congestión en las comunicaciones masivas M2M que utilizan la tecnología NB-IoT.

Palabras clave: análisis de rendimiento, canal de acceso aleatorio, comunicación máquina a máquina, NB-IoT, nivel CE.

ABSTRACT

The large-scale deployment of machine-to-machine (M2M) communications creates several challenges in cellular communication networks. To face these challenges, the Third Generation Partnership Project (3GPP) standardization body has developed the Narrowband Internet of Things (NB-IoT) technology as part of Release 13. The objective of this technology is to offer a reliable wireless connection under different demands of M2M traffic with peculiar characteristics. Since most NB-IoT transmissions are on the uplink, then the random-access channel (RACH) can be affected and become a bottleneck throughout the system.

This research analyzes the main metrics that define the performance of the RACH in NB-IoT technology under different demands of M2M traffic. For this, a simulation model was developed using the Matlab software. Among the main metrics analyzed, there is the probability of successful access, the number of user attempts in order to send the preamble, the number of subcarriers that intervened in the access, and the average access delay. Then, according to the recorded data, the RACH's performance in NB-IoT technology was evaluated by varying several parameters of the system and M2M traffic. The appropriate RACH configurations were identified to achieve reliable transmissions, that is, a probability of successful access greater than 90%. This is intended to have a clear vision of the RACH's behavior under several traffic conditions. This will serve as the basis for designing access control mechanisms in order to alleviate congestion in massive M2M communications that use NB-IoT technology.

Keywords: performance analysis, random access channel, machine to machine communication, NB-IoT, CE level



Reviewed by: Armas Geovanny, Mgs.
Linguistic Competences Professor

INTRODUCCIÓN

La Internet de las Cosas (*Internet of Things*, IoT) se refiere a la interconexión de un sistema de dispositivos que reciben y transmiten datos. Una de las tecnologías habilitantes para IoT es la comunicación máquina a máquina (*machine-to-machine*, M2M) la cual consiste en intercambiar información de forma automatizada entre los dispositivos en el borde de las redes (ordenadores, sensores, actuadores, automóviles o dispositivos móviles) (Tello Oquendo, et al., 2017). Se calcula que para el 2020 se habrán desplegado 50.000 millones de dispositivos conectados (Rapeepat, Nitin, & Amitava, 2015). Por lo tanto, en la red celular los operadores buscan la posibilidad de realizar comunicaciones M2M utilizando la tecnología *Long Term Evolution* (LTE); sin embargo, LTE fue diseñado para proporcionar un servicio de datos de banda ancha de alta velocidad con una latencia muy baja (Ratasuk, Mangalvedhe, & Ghosh, 2015).

El organismo de estandarización *Third Generation Partnership Project* (3GPP) ha venido trabajando en numerosas características de LTE, tales como ahorro de energía, ahorro de sobrecarga, reducción de señalización, reducción de complejidad y mejora de la cobertura. Por ello la tecnología LTE-A fue presentada como una ampliación de LTE (3GPP, Narrowband IoT (NB-IoT)). En el *Release 13* del 3GPP se han incluido dos nuevas características para soportar las comunicaciones de banda estrecha de tipo máquina y una de ellas es la tecnología NB-IoT (Ratasuk R., Mangalvedhe, Zhang, Robert, & Koskien, 2016).

NB-IoT es una tecnología de acceso radio para el sistema IoT, la cual adopta la técnica de acceso múltiple OFDMA de LTE-A existente, pero cada portadora solo requiere un ancho de banda de 180kHz. Puede desplegarse en 3 modos de operación diferentes: (1) *standalone*, el que opera en el canal de GSM (200kHz); (2) *in-band*, opera dentro de la anchura de banda ocupada de una portadora LTE de (180kHz) banda ancha y (3) *guard band*, utilizará un bloque de recursos físicos de LTE (180kHz). Como principal característica presenta una cobertura mejorada (*coverage enhancement*, CE) fiable que consiste en la repetición de la transmisión de señales que, a diferencia de LTE, el dispositivo fallido puede reiniciar todo el procedimiento de acceso aleatorio (*random access procedure*, RAP) en el siguiente nivel de CE superior.

Los objetivos de diseño de NB-IoT incluyen dispositivos de bajo coste, alta cobertura, larga duración de la batería del dispositivo (más de 10 años) y capacidad masiva (más de 52.000 dispositivos por canal y celda). Ericsson menciona que a finales de 2024 NB-IoT se espera que

cierre el 45% de todas las conexiones celulares para IoT. En el futuro, NB-IoT será capaz de coexistir plenamente en las bandas del espectro con 5G (Ericsson, 2019).

Es importante diferenciar los esquemas de comunicaciones móviles M2M y humano a humano (H2H). M2M transmite datos pequeños y poco frecuentes y principalmente con una dirección de tráfico en el enlace ascendente, mientras que, en las comunicaciones H2H, la dirección de tráfico es equilibrado o principalmente en el enlace descendente. Además, el tráfico M2M consiste en ráfagas, voluminosas y flujos de velocidad de bits constante o variable, esto quiere decir que, las aplicaciones en M2M tendrán ciclos de trabajo y el retardo de conexión debería ser muy corto para garantizar el acceso rápido a la red cuando se active, mientras que las aplicaciones basadas en la comunicación H2H toleran retardos de conexión más largos, pero es muy exigente una vez que se establece la conexión. Las aplicaciones M2M pueden requerir una prioridad muy alta debido a la información crítica y al mayor número de dispositivos que operen durante años o décadas sin mantenimiento.

En este trabajo de investigación se pretende analizar el rendimiento del canal de acceso aleatorio en la tecnología NB-IoT para la prestación de servicios de comunicación M2M. Una vez analizado, se procederá a modelar el canal de modo que se puedan obtener parámetros clave del rendimiento de la red bajo diversas condiciones de tráfico M2M. Con esto se pretende tener una visión clara del comportamiento del canal de acceso aleatorio bajo diversas condiciones de tráfico; esto servirá de base para el diseño de mecanismos de control para aliviar la congestión en las comunicaciones masivas M2M en la tecnología NB-IoT.

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

La tecnología NB-IoT ha sido introducida en la red celular por el 3GPP con el objetivo de soportar un gran número de sensores y dispositivos que se utilizan en diversas aplicaciones de IoT. Para ello se estudia la comunicación M2M como subconjunto del IoT que se caracteriza por utilizar dispositivos de bajo coste, baja potencia y baja velocidad de transmisión de datos. Estos dispositivos van a interactuar con los niveles de CE para transmitirse dentro del proceso de acceso aleatorio en la tecnología NB-IoT.

En esta conectividad existe el riesgo que, al existir una gran cantidad de dispositivos que intenten acceder a la red para la transmisión de datos, pueden ocurrir ciertos problemas como: colisiones con otros equipos de usuarios (*user equipments*, UEs) que también han decidido transmitir utilizando los mismos recursos físicos y enviar la petición de conexión al mismo tiempo, congestión, retardo de datos y fallo de intento del RAP.

Por lo anteriormente mencionado, se tiene como finalidad implementar un modelo analítico que permita obtener y analizar parámetros claves de rendimiento del canal de acceso aleatorio (RACH) bajo diversas condiciones de tráfico M2M en la tecnología NB-IoT. Con esto se pretende obtener una visión clara del comportamiento del canal de acceso aleatorio y que esta investigación sirva de apoyo para estudios posteriores que requieran desarrollar mejoras en el diseño de mecanismos de control de acceso en la red.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

- Analizar el rendimiento del canal de acceso aleatorio en la tecnología *Narrowband IoT* (NB-IoT) para la comunicación máquina a máquina.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el procedimiento de acceso aleatorio en la tecnología NB-IoT.
- Modelar el canal de acceso aleatorio para obtener indicadores clave de rendimiento de la red.
- Evaluar el rendimiento de la red bajo diferentes condiciones de tráfico mediante un modelo de simulación.

CAPÍTULO II

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. ANTECEDENTES

El estudio de (Antón Aro & Dohler, 2015) realiza una revisión general de los retos más importantes a los que se enfrenta 3GPP para apoyar a las comunicaciones M2M para ser soportado por las redes celulares: manejar un gran número de dispositivos, lograr un consumo de energía muy bajo, garantizar protocolos de baja complejidad para reducir el costo de los dispositivos, optimización de ahorro de energía en los dispositivos como en las redes y ampliar la cobertura para facilitar las transmisiones en un solo salto. Frente a estos desafíos se hace un estudio del procedimiento de acceso aleatorio en la tecnología LTE-A para la comunicación M2M para lo cual describe los problemas de sobrecarga de las redes de acceso radio (radio access network, RAN)/núcleo y propone soluciones para prevenir y/o resolver la sobrecarga del canal de control RACH. (Tello Oquendo, et al., 2017) mencionan que la tecnología LTE-A ha sido concebida para manejar el tráfico H2H mientras que su actual diseño no es capaz de manejar comunicaciones masivas M2M porque se genera una grave congestión al carecer de un esquema de control de congestión.

Los autores (Martiradonna, Grassi, Piro, Grieco, & Boggia) mencionan que el 3GPP proporcionó una respuesta concreta ante aquellos desafíos y aprobó el estándar NB-IoT, el cual está basado en la tecnología LTE y admite la mayoría de sus funcionalidades, aunque con simplificaciones esenciales para reducir la complejidad del dispositivo. NB-IoT es una tecnología óptima para los dominios de aplicación de IoT, misma que ofrece soporte de conexión para un número masivo de dispositivos, cobertura de área amplia, reducción de la complejidad de los dispositivos, larga duración de la batería y despliegue flexible. Con tales características será un apoyo para gestionar cantidades masivas de tráfico de M2M.

En (3GPP, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification (Release 13), 2018) se desarrolló un estudio para trabajos futuros en el procedimiento de acceso aleatorio de UE NB-IoT, y se puede observar la diferencia que hay en el mensaje uno del RACH con respecto a LTE-A y es la aplicación de número de repeticiones necesarias para la transmisión del preámbulo por intento a cada nivel de cobertura.

La Asociación GSM confirma la importancia de los niveles de CE del 3GPP en la tecnología NB-IoT, porque el objetivo es facilitar el acceso de transmisión de los dispositivos en zonas de aparcamientos y las fosas del suelo. Los niveles de CE permiten la transmisión repetida de la señal con el fin de que otros dispositivos de IoT funcionen en lugares que de otro modo no es posible (GSMA, June 2019). En el *Release 13* de 3GPP se han definido tres modos de CE como: CE0, CE1 y CE2 en el que existe una diferencia de 10dB entre cada uno de ellos.

2.2.SISTEMA DE COMUNICACIÓN MACHINE TO MACHINE (M2M)

M2M es una tecnología que permite que los dispositivos interactúen entre sí a través de una red de comunicación alámbrica o inalámbrica sin ninguna intervención humana. Generalmente esta tecnología emplea sensores, actuadores, transceptores, entre otros, que adquieren los datos de los dispositivos finales o los eventos que se transmiten a través de una red de comunicación a un software de aplicación como se muestra en la **Figura 1**.

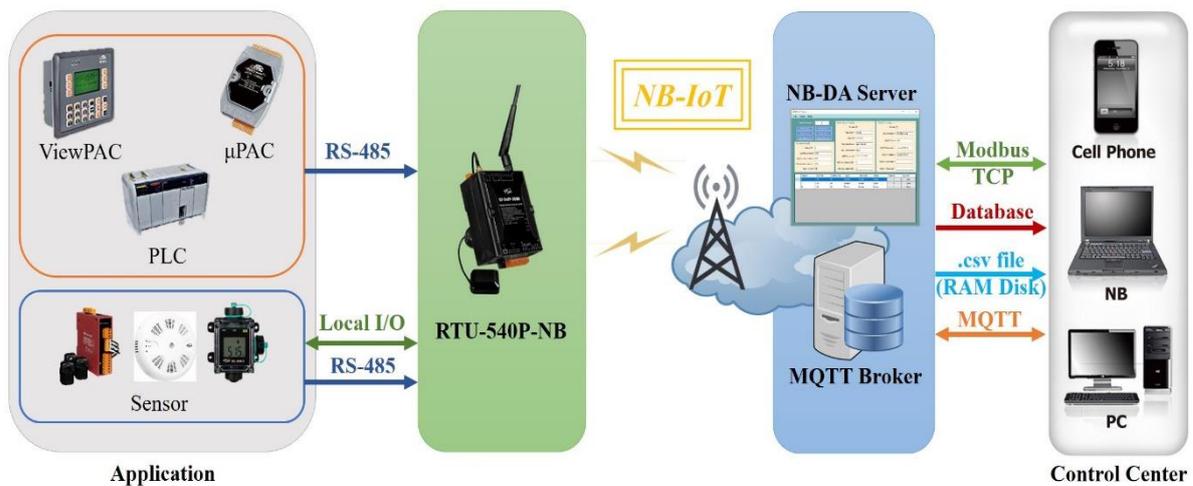


Figura 1. Modelo del sistema de comunicación M2M

Fuente: (GPS, 2019)

Las redes LTE-A se diseñaron para satisfacer las necesidades de las aplicaciones H2H que suelen ser aplicaciones que operan en banda ancha. Por el contrario, las aplicaciones M2M son aplicaciones que operan en banda estrecha porque transmiten secuencias de pequeños tamaños de

paquetes como: temperatura, humedad, ubicación, entre otros) en forma de ráfagas irregulares (AZOU , et al., 2018).

2.3.TECNOLOGÍA NARROWBAND INTERNET OF THINGS

Narrowband Internet of Things (NB-IoT) ha sido introducida en el *Release 13* del 3GPP como una tecnología de acceso celular, diseñada para lograr una coexistencia con el legado GSM, GPRS y tecnología LTE. NB-IoT es una versión caracterizada por su baja energía y bajo ancho de banda de 180kHz a 200kHz para IoT y la comunicación M2M (Harwahu & Cheng, Investigating the Performance of the Random Access, 2017).

2.3.1. CARACTERÍSTICAS

- Puede soportar más de 52000 conexiones (dispositivos) por canal los cuales tienen requerimientos limitados: menor cantidad de datos y poca frecuencia y cuya latencia no es crítica.
- Cada portadora de NB-IoT requiere solo un ancho de banda de 180kHz.
- Diseño de dispositivos orientado a una mejor eficiencia de energía permitiendo una larga duración de vida de la batería hasta alrededor de 10 años.
- Utiliza retransmisiones múltiples y una señal a ruido con interferencia (*signal-to-interference noise ratio*, SINR) mejorada. En relación con las repeticiones para alcanzar una mayor extensión en la zona de cobertura (CE), se establece tres niveles: nivel 0, nivel 1 y nivel 2 dependiendo del número de repeticiones.
- Coexistencia con LTE y 2G a través de diferentes modos de despliegue: *standalone*, *guard band* e *in-band*.
- Modelos sencillos de modulación (QPSK) que permiten que las terminales sean más fáciles y baratos de fabricar.

2.3.2. MODOS DE OPERACIÓN

La tecnología NB-IoT ocupa un ancho de banda de 180kHz (Schwarz & Rohde, 2016), que corresponde a un bloque de recursos en la transmisión LTE. Con esta selección son posibles los siguientes modos de operación, como se ilustra en la **Figura 2**.

- **Operación *Standalone*:** Es la utilización de las frecuencias GSM utilizadas actualmente. Con su ancho de banda de 200kHz, todavía queda un intervalo de guarda de 10kHz en ambos lados del espectro.
- **Operación *Guard band*:** Ocupa un bloque de recursos no utilizado dentro de la banda de guarda de una portadora LTE.
- **Operación *In-band*:** Una o más portadoras NB-IoT se despliegan dentro de un canal LTE más grande.

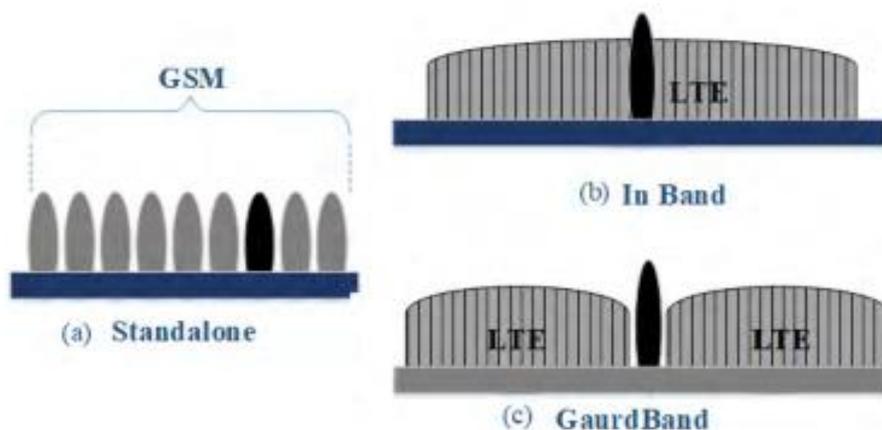


Figura 2. Modos de operación NB-IoT

Fuente: (POPLI, KUMAR JHA, & JAIN, A Survey on Energy Efficient Narrowband Internet of Things (NB-IoT): Architecture, Application and Challenges, 2019)

2.3.3. ESTRUCTURA DE TRAMA

3. La estructura de la trama de NB-IoT se ilustra en la **Figura 3** el cual describe el ciclo de una hipertrama que tiene 1024 hipertramas y cada uno consta de 1024 tramas. Cada trama consta de 10 subtramas y cada una se divide en dos slots de 0.5 ms, para el diseño de NB-IoT se admite un espacio de subportadoras de 15 kHz en el cual cada trama contiene 20 slots y para subportadoras de 3.75 kHz cada trama tiene una duración de slot de 2ms.

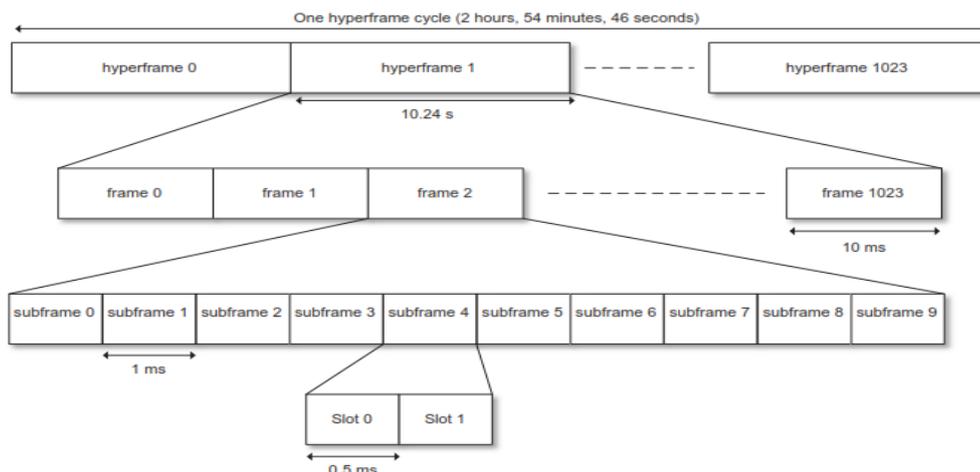


Figura 3. Estructura de trama para NB-IoT para el espacio de subportadoras de 15kHz.

Fuente: (WANG, BERGMAN, SACHS, LIBERG, & SUNDBERG, 2018)

3.1.1. COBERTURA MEJORADA

La tecnología NB-IoT está diseñada para soportar dispositivos IoT que operen en áreas interiores, profundas y remotas. Para satisfacer estos requerimientos, el *Release 13* aprovecha los requisitos de IoT como la velocidad y la latencia de los datos para introducir un conjunto de técnicas para mejorar la cobertura. La mejora se estima con una ganancia de +20dB lo que corresponde a una pérdida máxima de acoplamiento (*maximum coupling loss*, MCL) de 164dB.

La técnica consiste en tres niveles de cobertura:

Nivel CE 0: Cobertura normal con $MCL \approx 144$ dB;

Nivel CE 1: Cobertura robusta con $MCL \approx 154$ dB;

Nivel CE 2: Cobertura extrema con $MCL \approx 164$ dB.

Los tres niveles de CE también están definidos por la señal de referencia de la potencia recibida (RSRP) medido por el dispositivo y las pérdidas de trayecto del UE. Los dispositivos en el nivel CE más bajo tienen el RSRP más alto y baja pérdida de trayectoria mientras que los dispositivos en el nivel CE más alto tienen el RSRP más bajo con alta pérdida de trayectoria como se muestra en la **Figura 4**.

La repetición de varias veces de los datos de transmisión y señalización de control asociada varias veces se ha utilizado como un enfoque prometedor para lograr una mejora de la cobertura del NB-IoT [19], ya que un mayor número de repeticiones aumentará la fiabilidad. En particular, la

repetición para el NB-IoT sólo puede seleccionarse entre {1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128}, lo que significa el número de repetición permisible del mismo bloque de transmisión.

El principal impacto de los niveles de CE es que el mensaje puede retransmitir un número diferente de veces, donde el número de repeticiones configurado es mayor para el nivel de CE que presenta una alta pérdida de trayectoria.

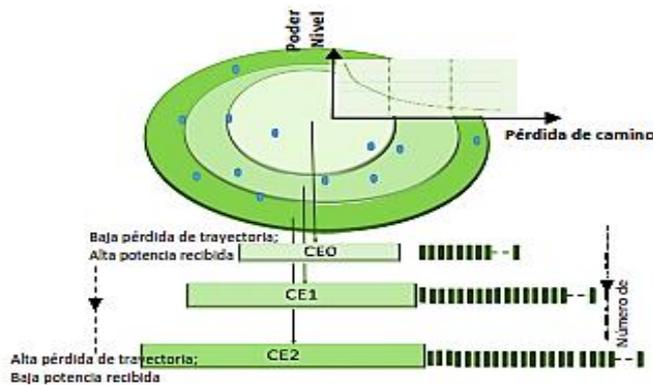


Figura 4. Niveles de CE y repeticiones.

Fuente: (Agiwal, Maheshwari, & Jin, 2019)

3.1.2. PROCEDIMIENTO DE ACCESO ALEATORIO

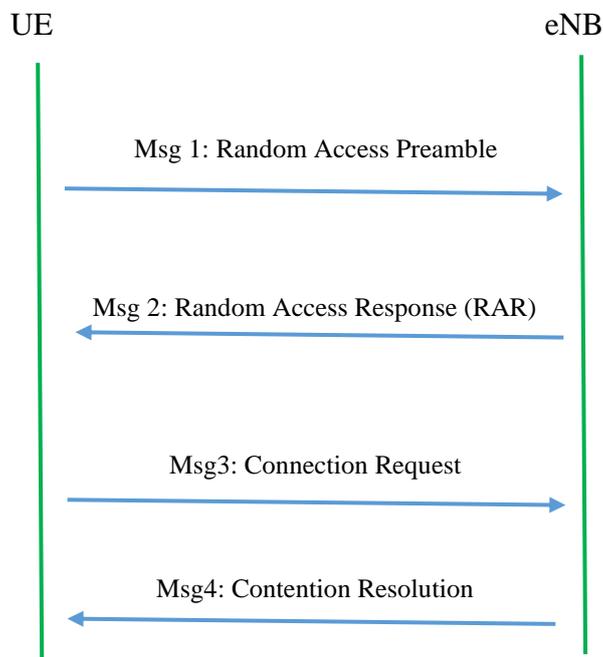


Figura 5. Procedimiento de acceso aleatorio para NB-IoT

Fuente: Autor.

El RAP en la tecnología NB-IoT (ilustrado en la **Figura 5**) sirve para múltiples propósitos; por ejemplo, el acceso inicial para establecer un enlace de radio, solicitud de programación, sincronización de enlace ascendente. El inicio del RAP es por la propia capa MAC o por una subcapa de control de recursos radio (*radio resource control*, RRC); aunque antes de este proceso, el UE tiene información sobre el conjunto de recursos disponibles del canal de acceso aleatorio físico PRACH.

La selección de los recursos PRACH se basa en la medición de la potencia de la señal recibida RSRP que especifica el nivel de CE que soporta la *serving cell* (POPLI, KUMAR JHA, & JAIN, A Survey on Energy Efficient Narrowband Internet of Things (NB-IoT): Architecture, Application and Challenges, 2019). A continuación, se muestra el proceso de funcionamiento de los cuatro mensajes del procedimiento de acceso aleatorio para NB-IoT.

Mensaje 1, Preámbulo de acceso aleatorio

Un dispositivo NB-IoT mide el RSRP para identificar el nivel CE. Los recursos del canal de acceso aleatorio físico *Narrowband* con su acrónimo (NPRACH) se asigna a los niveles de CE y cada conjunto se divide a su vez en grupos de preámbulos de acceso aleatorio para la transmisión de Msg3 de un solo tono y multitono. Posteriormente, el dispositivo selecciona aleatoriamente un preámbulo basado en el grupo o grupos de subportadoras disponibles en el nivel CE identificado. Una vez transmitido el preámbulo. El primer UE calcula su acceso aleatorio - identificador temporal de la red de radio (*random access – radio network temporal identifier*, RA-RNTI).

Mensaje 2, Respuesta de acceso aleatorio

Cuando la estación base (BS) detecta la transmisión del preámbulo del UE, envía una respuesta de acceso aleatorio (*random access response*, RAR o Msg2) correspondiente al RA-RNTI del equipo de usuario. Con la RAR, el UE obtiene el orden de avance de tiempo y la autorización del enlace ascendente para la transmisión del Msg3.

Si la transmisión del preámbulo no tuvo éxito (es decir no recibió RAR) el UE transmite otra vez el preámbulo. El procedimiento de acceso aleatorio se reintenta después del tiempo de back-off con la potencia aumentada puede ser en el mismo nivel CE o en el siguiente nivel CE.

Mensaje 3, Petición de conexión

Si más de un UE selecciona el mismo preámbulo con los mismos recursos de enlace ascendente se produce una colisión y ninguno de los dispositivos colisionados transmitirá con éxito el Msg3. Posteriormente se transmite un mensaje programado, una solicitud de conexión RRC (Msg3) para iniciar el proceso de resolución de contención.

Mensaje 4, Resolución de Contienda

Si el mensaje CR se recibe antes de que el temporizador de resolución de contención expire, el procedimiento de acceso aleatorio se considera que ha terminado con éxito. Sin embargo, los UEs que no reciben el mensaje CR, realizan un tiempo de *backoff* aleatorio y retransmiten un nuevo intento en una subportadora inicial recién elegida en el próximo NPRACH.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. INVESTIGACIÓN EXPLORATORIA

Este tipo de investigación permite examinar un tema específico mediante la recopilación de información científica que existe sobre el estudio a desarrollar. El objetivo es obtener más información sobre la investigación de manera que el investigador tenga una visión amplia y clara del tema y posteriormente a través del análisis de toda la información recopilada se generará preguntas para investigaciones posteriores (Winston, 2014). En este proyecto se recopila información de estudios científicos sobre la tecnología NB-IoT para la comunicación M2M como también sobre el funcionamiento del RACH debido a la problemática del *handshake* inicial en términos de retardo y probabilidad de acceso. Se obtendrán métricas de rendimiento de la red para la tecnología NB-IoT bajo diferentes demandas de tráfico M2M, con el objetivo de obtener una visión clara del comportamiento del RACH e identificar sus debilidades para proponer mejoras de rendimiento de la red.

3.2. MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

3.2.1. MÉTODO CIENTÍFICO

El método científico es un proceso que tiene como finalidad establecer la relación que tienen diferentes hechos, para obtener un criterio fundamental y comprobable sobre el tema de investigación. En este caso se podrá establecer criterios del modelo analítico, métodos de aproximación para mejorar el rendimiento del canal de acceso aleatorio en la tecnología NB-IoT como son: Probabilidad de acceso satisfactorio y retardo en el acceso.

3.2.2. TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS.

La técnica de observación se fundamenta en un conjunto de normas encaminadas a evaluar un fenómeno en particular para saber la realidad de dicho fenómeno, para analizar con precisión y de forma sistemática cualquier situación que ocurra con respecto a los objetivos planteados en la investigación. En este caso los parámetros serían: el número promedio estimado de dispositivos

contendientes inicialmente en un nivel CE, UEs con transmisión exitosa y colisionados en el proceso de acceso aleatorio, retardo en el acceso y número de transmisiones de preámbulo.

3.2.3. INSTRUMENTOS

Los instrumentos para el desarrollo del presente documento son los siguientes:

- 3GPP TS 36.321 Especificaciones del protocolo de control de acceso medio.
- 3GPP TS 36.211 trata sobre los canales físicos y modulación
- 3GPP TS 36.101 detalla sobre usuario de equipo (UE) en la transmisión y recepción de radio
- Artículos científicos relacionados con respecto al RACH en la tecnología NB-IoT,
- Artículos científicos experimental del RACH en la tecnología LTE-A con tráfico masivo M2M.
- Manual de instalación y uso MATLAB R2020a

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.3.1. POBLACIÓN

La población se define como el conjunto de número de dispositivos que intentan acceder a la red. Este número varía desde 1 a 1000 y están distribuidos en el tiempo siguiendo una distribución estadística para los tiempos de llegada (modelo de tráfico M2M sugerido por el 3GPP). Esta población se somete al modelamiento del canal de acceso aleatorio bajo diferentes condiciones de tráfico para la recolección de datos.

3.3.2. MUESTRA

La muestra consiste en el número de dispositivos que han culminado satisfactoriamente el procedimiento de acceso aleatorio. De ellos se estudiaron los parámetros claves del rendimiento en la red como retardo y probabilidad de acceso satisfactorio.

3.4. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Variable dependiente

Rendimiento del RACH

Variable independiente

Configuración RACH

Tabla 1. Operacionalización de las variables

Fuente: Autor

| VARIABLE | CONCEPTO | INDICADORES | INSTRUMENTO |
|----------------------|---|--|--|
| Rendimiento del RACH | Permite evaluar la fiabilidad de operación del RACH ante diferentes demandas de tráfico de UEs. | <ul style="list-style-type: none">- Probabilidad de acceso satisfactorio- Retardo en el acceso | Observación directa a través de un modelo de simulación del procedimiento de acceso aleatorio (Matlab) |
| Configuración RACH | Establecer parámetros de funcionamiento en el modelo analítico para simular el RACH. | <ul style="list-style-type: none">- Número máximo de intentos de transmisión de preámbulos- Número de subportadoras en el RACH- Número de usuarios en tienda en el RACH. | |

3.5.PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS

Para analizar el rendimiento del canal de acceso aleatorio en la tecnología NB-IoT, se planteó realizar un modelado del RAP que permita evaluar métricas de rendimiento de la red bajo diferentes demandas de tráfico M2M, de manera que, se pueda identificar el rendimiento del canal de acceso aleatorio. El procedimiento que se siguió para el análisis es el siguiente **Figura 6**.

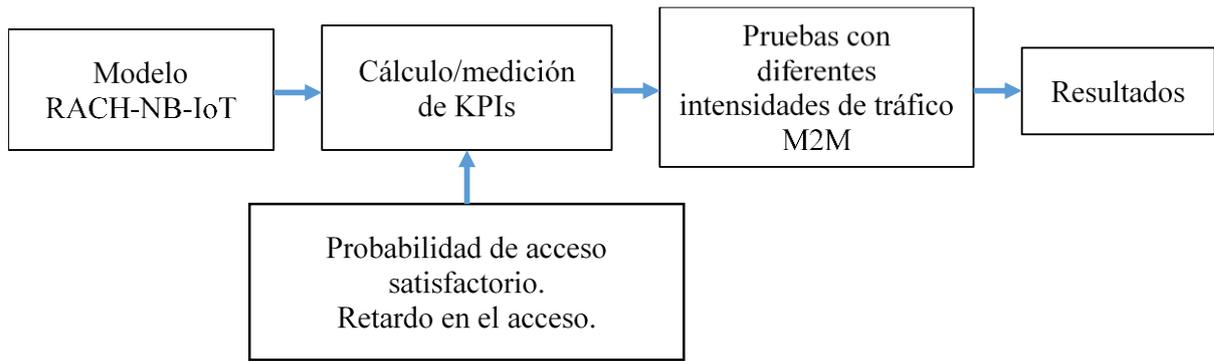


Figura 6. Procedimiento para análisis y obtención de resultados

Fuente: Autor

1. Realizar una revisión sistemática de literatura sobre NB-IoT, RAP y el sistema de comunicación M2M.
2. Desarrollar un modelo analítico para analizar el RAP.
3. Instalar MATLAB 2020 y demás librerías de NB-IoT para simular y medir los parámetros a analizar.
4. Implementar en líneas de código el modelo analítico y observar su funcionamiento.
5. Ingresar diferentes demandas de tráfico M2M en la simulación, para obtener los parámetros fiables de rendimiento, que deberían cumplir con las siguientes condiciones: probabilidad de acceso satisfactorio $P_s \geq 0.9$ obtenidos con menor número de subportadoras, repeticiones y retardo promedio, los cuales se encuentran parametrizados en la **Tabla 2**.

3.5.1. Diagrama secuencial del procedimiento de acceso aleatorio

Para el desarrollo del RAP en el script de Matlab, se debe realizar de manera adecuada y ordenada la estructura lógica del proceso, con el objetivo de obtener una correcta implementación como se muestra en la **Figura 7**. También se debe realizar la inclusión de librerías para simular los requerimientos del PRACH con el fin de obtener los datos óptimos para su análisis.

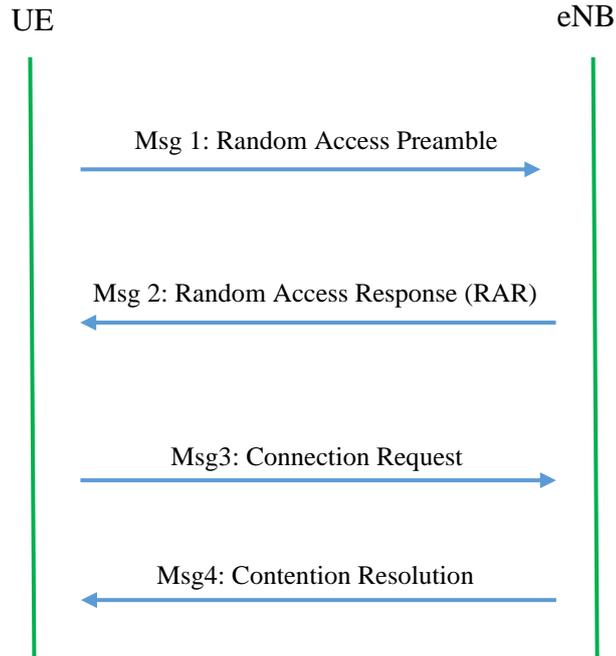


Figura 7. Procedimiento de acceso aleatorio para NB-IoT.

Fuente: Autor.

3.5.2. Mensaje 1: Preámbulo de acceso aleatorio

3.5.2.1. Niveles de Cobertura mejorada

Para configurar la red con los tres niveles CE como se muestra en la **Figura 8** se debe tomar en cuenta la potencia de la señal de referencia recibida (RSRP) medida por el dispositivo. Los dispositivos en el nivel CE más bajo tiene el RSRP más alto y mientras que los dispositivos en el nivel CE más alto tiene el RSRP más bajo, posteriormente el mensaje tiene oportunidad de retransmisión dependiendo del número de veces parametrizado en cada nivel y si no transmitió en el nivel inicial tiene oportunidad de transmisión en el nivel superior.

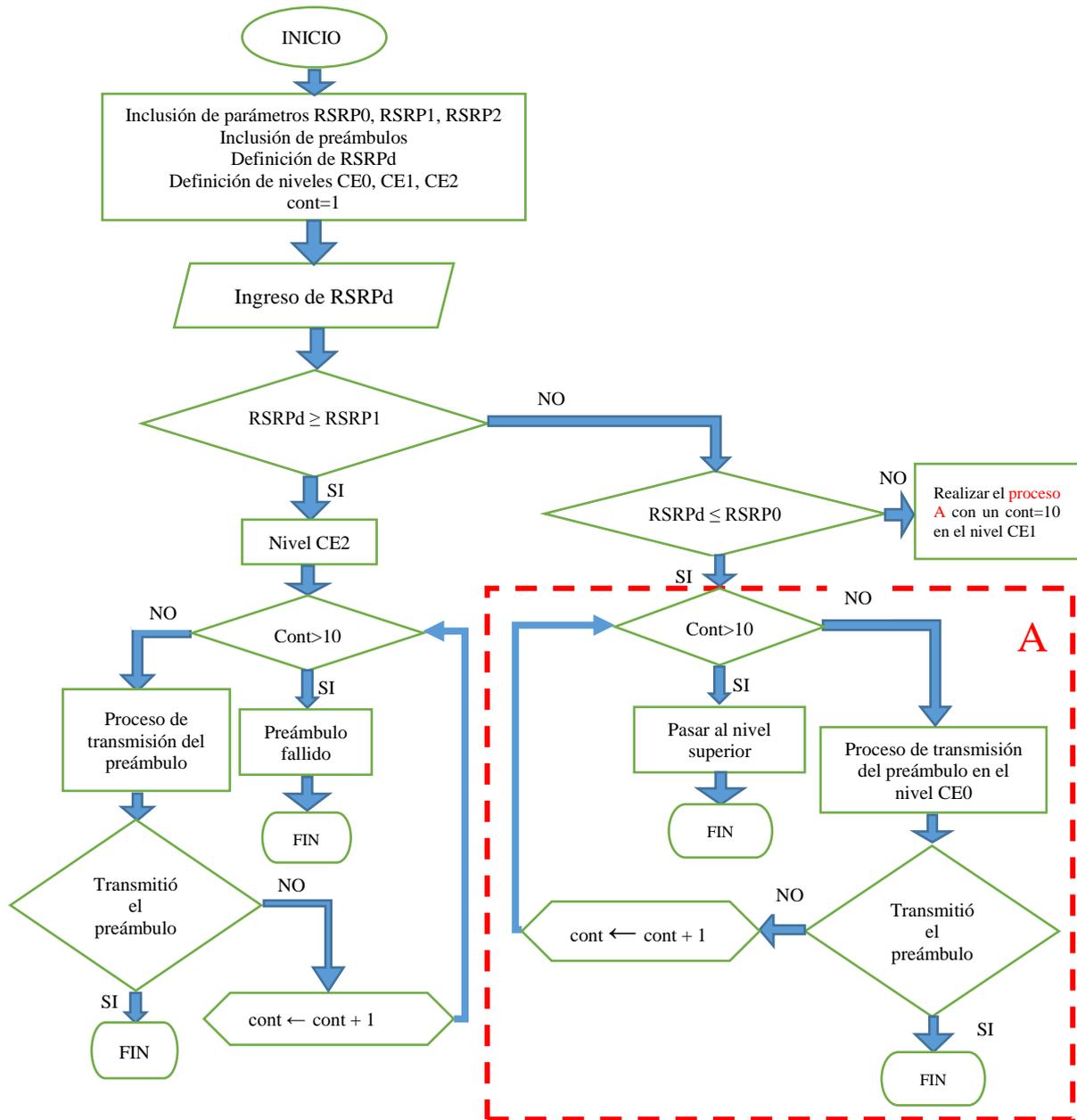


Figura 8. Secuencia de transmisión para cada nivel CE

Fuente: Autor.

3.5.3. Mensaje 2: Respuesta de acceso aleatorio.

Después que el eNB detecta el preámbulo transmitido por el UE, posteriormente se procede a evaluar el RA-RNTI correspondiente al preámbulo transmitido como se muestra en la **Ecuación 1**, para enviar una respuesta de acceso aleatorio, donde el equipo de usuario obtiene la orden de avance de tiempo y la concesión de enlace ascendente para la transmisión del Msg3 observar la **Figura 9**.

$$RA - RNRI = 1 + \text{floor}\left(\frac{SFN_id}{4}\right)$$

Ecuación 1. Random Access-Radio Network Temporary Identifier

Fuente: (3GPP, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification (Release 13), 2018, pág. 23)

SFN_id = Es el índice de la primera trama de radio del PRACH especificado.

Floor() = Denota una función que redondea un número al entero más cercano inferior.

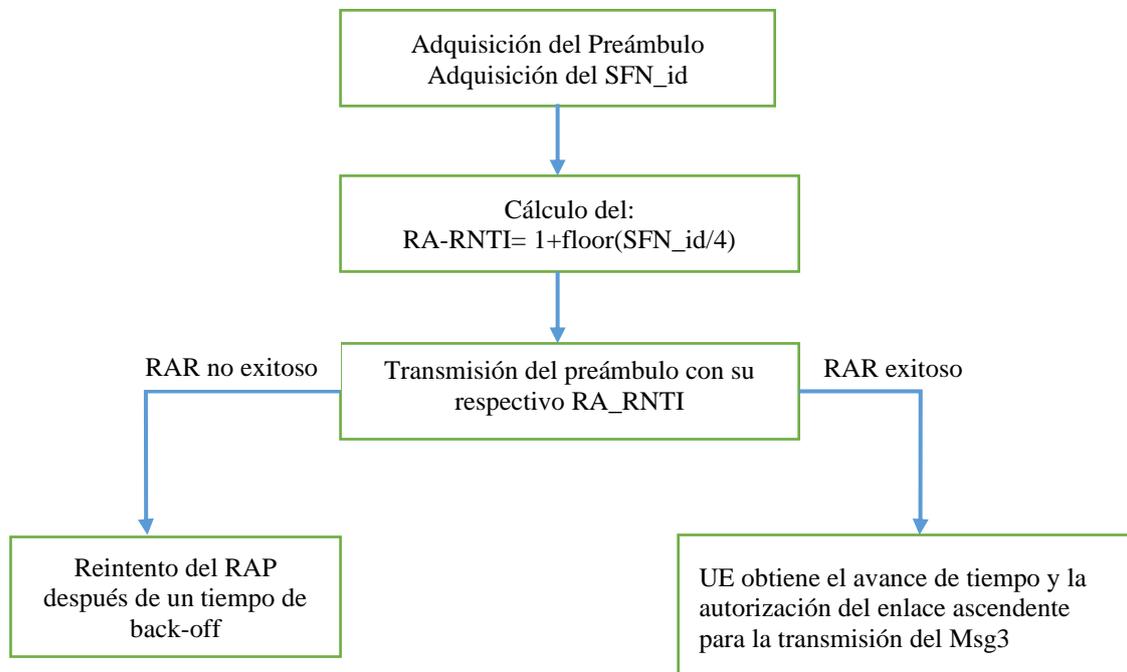


Figura 9. Procedimiento del Msg2

Fuente: Autor.

3.5.4. Mensaje 3: Petición de conexión

En la **Figura 10** se hace referencia a la transmisión del UE hacia el eNB solicitando conexión, donde se toma en cuenta que el UE reciba la respuesta de acceso aleatorio con éxito para transmitir el Msg3 con los recursos especificados en el RAR y posteriormente se inicia el proceso de resolución de contención. Donde el Msg3 contiene el identificador específico (C-RNTI) del UE.

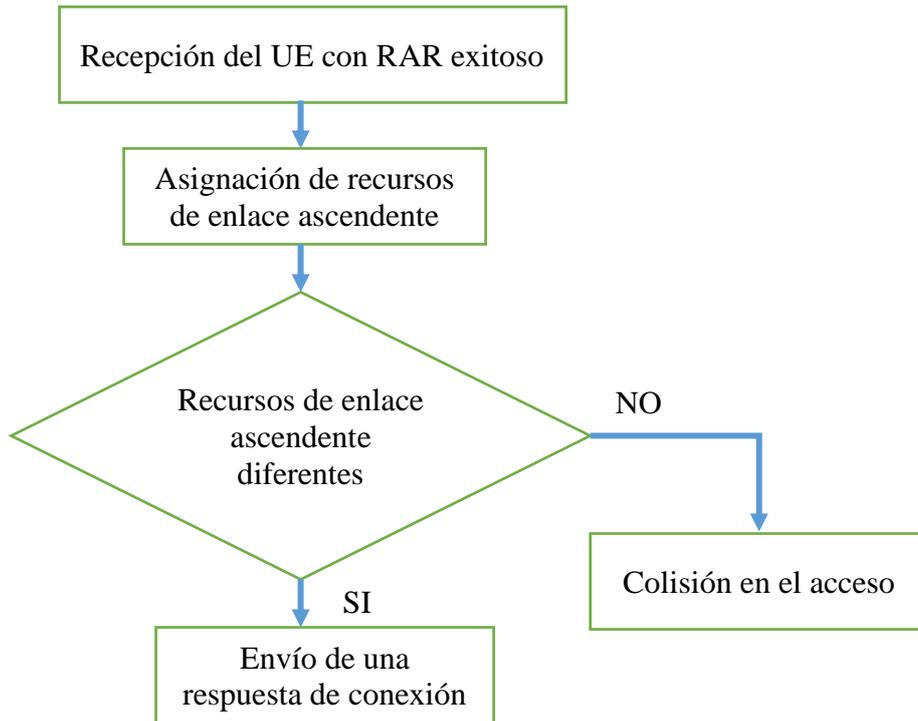


Figura 10. Proceso del Msg 3 del procedimiento de acceso aleatorio

Fuente: Autor.

3.5.5. Mensaje 4: Resolución de contienda

Se realiza la configuración del mensaje 4 como se muestra en la **Figura 11** donde eNB devuelve el C-RNTI de un UE (Msg 4). La UE, al verificar que propio C-RNTI ha sido reflejado entonces se considera que el procedimiento de acceso aleatorio ha sido transmitido con éxito y posteriormente realizará la transmisión de paquetes de datos.

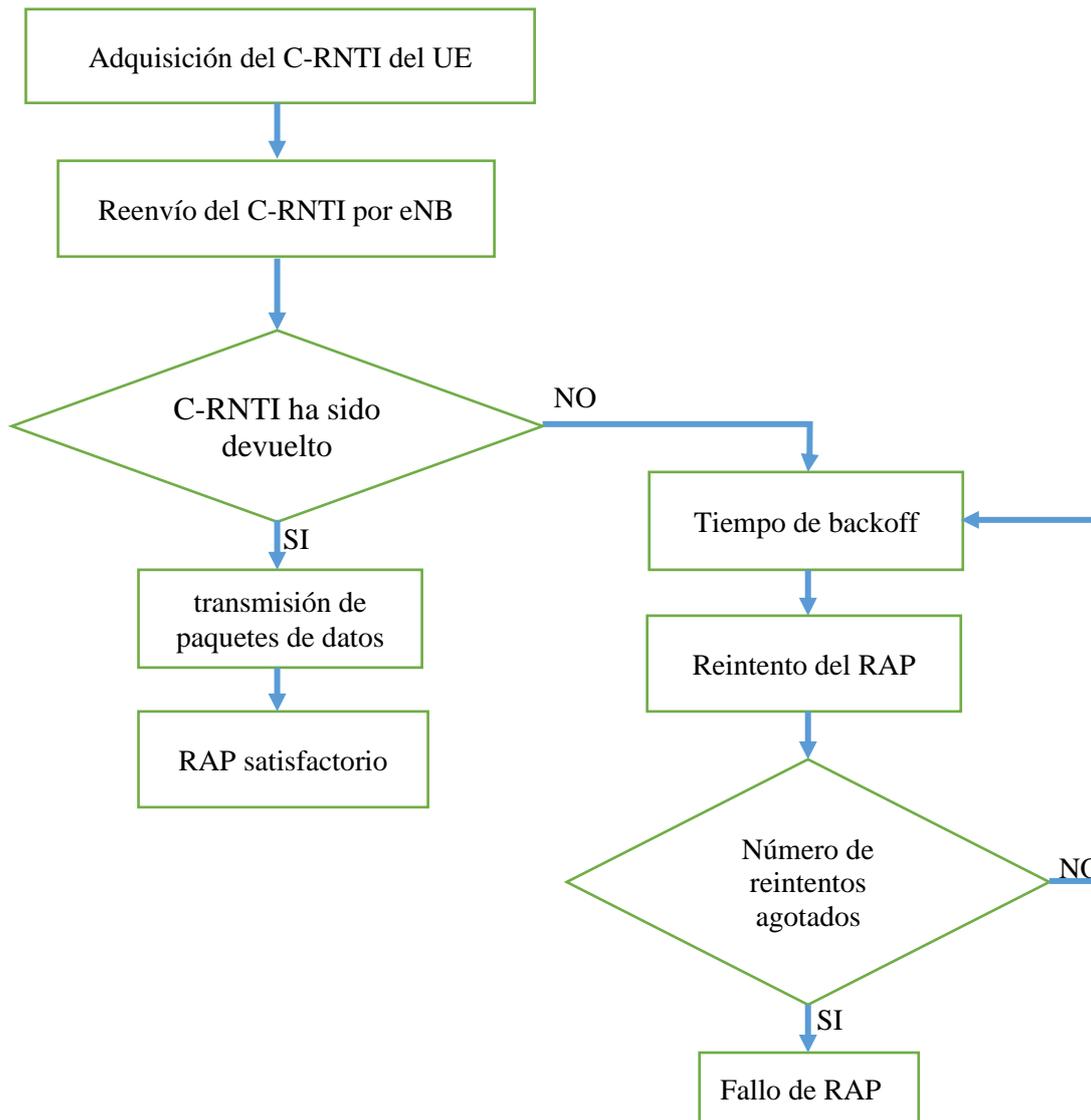


Figura 11. Procedimiento de acceso aleatorio para el Msg 4

Fuente: Autor.

3.6.Indicadores clave de rendimiento.

3.6.1. Probabilidad de acceso satisfactorio

La probabilidad que el UE seleccione cualquiera de las n subportadoras disponibles es igual a $1/n$. Por lo tanto, con un terminal activo, la probabilidad satisfactoria (P_s), es decir, la probabilidad de que un dispositivo seleccione una subportadora de las n disponibles se calcula como:

$$Ps = (1-1/n)$$

Ecuación 2. Probabilidad satisfactoria para un UE activo

Fuente: (Barnett Jr, Jain, Andra, & Sumits, 2015)

Con el aumento sucesivo del número de terminales activos en la red, se concluye que la probabilidad de acceso satisfactorio, dado el número de subportadoras n y el número de terminales activos k pueden calcularse como

$$ps(n, k) = (1 - 1/n)^k$$

Ecuación 3. Probabilidad de acceso satisfactorio en función de terminales activos y subportadoras

Fuente: (Brito, Baracat, & Sapucaí, 2018)

Sin embargo, como se ha visto en la sección anterior, si un UE no obtiene una respuesta satisfactoria durante la ventana de respuesta de la secuencia del preámbulo, el UE debe enviar una nueva secuencia de preámbulos, respetando el parámetro $maxNumPreambleAttempt$, a fin de aumentar la probabilidad en el acceso. Consideremos el $maxNumPreambleAttempt$ como r_{max} . Por lo tanto, al final la probabilidad de acceso satisfactorio, considerando el número de intento máximo r_{max} puede escribirse como

$$\begin{aligned} Ps &= \sum_{j=1}^{r_{max}} ps(n, k) \times (1 - ps(n, k))^{j-1} \\ &= 1 - (1 - ps(n, k))^{r_{max}} \\ &= 1 - (1 - 1/n)^k)^{r_{max}} \end{aligned}$$

Ecuación 4. Probabilidad de acceso satisfactorio para número de intento

Fuente: (3GPP, 2015)

3.6.2. Retardo de acceso

Tenemos dos tipos de variables para calcular el retardo en el acceso: variables aleatorias y variables determinísticas.

Variabes aleatorias:

- El UE inicia la solicitud de acceso: 0ms para $nprachPeriodicity$. Esto se puede modelar con una distribución uniforme (es decir, $T_0 = U(0, nprach - periodo)$).
- Número de intentos para transmisión satisfactoria del preámbulo. El número de reintentos r está limitado por el parámetro r_{max} y tiene una probabilidad dada por:

$$P[r = x] = p_s(n, k)(1 - p_s(n, k))^{x-1}$$

Ecuación 5. Retardo

Fuente: (Lin, Adhikary, & Wang, 2016)

con $1 \leq x \leq r_{max}$.

Variabes deterministas:

- T_{PA} es la duración del preámbulo (6,38664ms)
- T_{wait} es el período de espera entre el final de la transmisión del preámbulo y el comienzo de la ventana de respuesta (8ms u 84 ms, dependiendo del parámetro $numRepetitionsPerPreambleAttempt$, es decir $nRep$).
- $ra-ResponseWindowSize$ es la duración del mensaje RAR.
- T_{int} es el intervalo entre cada intento del preámbulo (12 ms).
- T_r es el retardo debido al número de reintentos, se calcula por

$$T_r = r [(nRep T_{PA}) + T_{wait} + ra - ResponseWindowSize] + [(r - 1)T_{int}]$$

Entonces, el retardo de cada intento puede ser calculado como

$$T_d = T_0 + nprach_{StartTime} + T_r$$

Ecuación 6. Retardo en el acceso

Fuente: (Brito, Baracat, & Sapucaí, 2018)

Mientras que el valor promedio se calcula como:

$$E(T_r) = \sum_{r=1}^{r_{max}} \left\{ r \chi \left[(nprach_{NumRepetition} \chi T_{PA}) + T_{wait} + ra_{ResponseWindowSize} \right] + [(r - 1) \chi T_{int}] \right\} \chi \frac{P_{s(n,k)} \chi (1 - P_{s(n,k)})^{r-1}}{P_S}$$

Ecuación 7. Retardo promedio en el acceso de los UEs

Fuente: (Brito, Baracat, & Sapucaí, 2018)

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ESCENARIO DE RED

Se considera una sola implementación de NB-IoT en un eNB con radio celular r_{cell} m.

En NB-IoT, los usuarios se colocan en diferentes niveles de CE de acuerdo con la calidad del canal inalámbrico. Esto puede realizarse, por ejemplo, basándose en la intensidad de la señal recibida con respecto a las señales de referencia. Hay tres niveles de CE, a conocer, 0, 1 y 2, donde los usuarios del nivel CE 0 tienen mejores condiciones y los del nivel CE 2 tienen peores condiciones.

Los dispositivos NB-IoT pueden emplear réplicas de paquetes que ayuden a mejorar el SNR. El número de repeticiones es seleccionado por gNB, donde, los dispositivos que se encuentran en el nivel 2 de CE pueden requerir mayor número de repeticiones que los que se encuentran en el nivel CE 0. Específicamente, el sistema NB-IoT tolera hasta 164 dB de pérdida en los canales inalámbricos con el número máximo de repeticiones. Esto se conoce como la máxima pérdida de acoplamiento (MCL).

4.2. MODELO DE TRANSMISIÓN NB-IOT

Antes de iniciar la transmisión, el dispositivo debe obtener algunos parámetros del sistema de la estación base, como la sincronización de enlace ascendente y las señales de sincronización a través de los mensajes MIB y SIB. Estos mensajes se reciben a través del canal de transmisión física de banda estrecha (NPBCH). Una vez recibido los parámetros del sistema detallados en el cuadro II, el procedimiento de acceso aleatorio se inicia mediante la transmisión NPRACH.

La transmisión NPRACH consiste en el envío de preámbulos de *numRepetitionsPerPreambleAttempt* sin intervalos, definidos por el número de repeticiones establecidas, y mezclados con uno de los valores del Identificador Temporal de la red de radio de Acceso Aleatorio (RA-RNTI), que se define por un algoritmo que depende del instante de tiempo de transmisión (Ghasempour, 2016)

Para el nivel de cobertura más bajo, la transmisión se calcula de la siguiente manera:

$$\text{PNPRACH} = \min (P_{\text{CMAX}}(i), \text{NPRTP} + \text{Pr}(d))$$

Ecuación 8. Transmisión para el nivel más bajo

Fuente: (Gartner, 2014)

donde, $P_{\text{CMAX}}(i)$ es la potencia de transmisión configurada para el dispositivo de la subtrama i , NPRTP es la potencia del preámbulo de banda estrecha recibida en la estación base y $\text{Pr}(d)$ es la pérdida de trayectoria estimada a la distancia d , calculada por el dispositivo.

Para la configuración del nivel de cobertura más alto, la potencia de transmisión del preámbulo es calculada de la siguiente manera.

$$\text{PNPRACH} = P_{\text{CMAX}}(i)$$

Ecuación 9. Potencia de transmisión del preámbulo

Fuente: (Elkhodr, Cheung, & Shahrestani, 2016)

El preámbulo es una secuencia de 4 grupos de símbolos transmitidos en una sola subportadora, con un salto de frecuencia, donde cada grupo está formado por un prefijo cíclico (Ghasempour, 2016).

Después de enviar los preámbulos, el dispositivo espera una confirmación de la red dentro de una ventana de respuesta con duración $ra\text{-ResponseWindowSize}$. Esta ventana de respuesta comienza después de las subtramas n_{sf} después de las subtramas que contiene el final de las repeticiones del preámbulo; el valor n_{sf} se determina según la Tabla 2. Caso contrario, la ventana de respuesta comienza cuatro subtramas después de la subtrama que contiene el final de las repeticiones del preámbulo (Ghasempour, 2016). En esta etapa hay dos posibles resultados:

- 1) Si durante el $ra\text{-ResponseWindowSize}$ el dispositivo no detecta la información de control de enlace descendente (DCI) en el NPDCCH, barajado por el RA-RNTI correspondiente, o si puede detectar, pero no hay respuesta a la secuencia transmitida, el dispositivo debería enviar una nueva secuencia de preámbulos en un término de 12ms después de recibir la subtrama que contiene la respuesta. Este proceso se repite hasta alcanzar $maxNumPreambleAttempt$. Si hasta entonces no se ha producido una transmisión exitosa, se considera un acceso fallido.

- 2) Si durante el *ra-ResponseWindowSize* el UE detecta el DCI codificado por RA-RNTI en el NPDCCH y hay una respuesta a la secuencia transmitida, el UE envía una solicitud de conexión RRC, utilizando los recursos indicados por la red, y espera una respuesta de la red durante el temporizador T300, según la tabla II. Entonces son posibles dos resultados:
- Si la red recibe un *acknowledgment* (ACK) durante el T300, el UE continúa conectándose e inicia la transmisión o recepción de datos, indicando así la culminación del procedimiento de acceso aleatorio.
 - Si no se recibe ningún ACK de la red, el UE puede iniciar de nuevo el procedimiento de acceso aleatorio después de un período de retroceso, si así lo indica las capas superiores (RRC).

4.3.CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS

| Parámetros | Valor |
|---|---|
| <i>nprach-Periodicity</i> | {ms40, ms80, ms160, ms240, ms320, ms640, ms1280, ms2560} |
| <i>nprach-StartTime</i> | {ms8, ms16, ms32, ms64, ms128, ms256, ms512, ms1024} |
| <i>nprach-NumSubcarriers</i> | {n12, n24, n36, n48} |
| <i>nprach-SubcarrierOffset</i> | {n0, n12, n24, n36, n18, n34} |
| <i>numRepetitionsPerPreambleAttempt</i> | {n1, n2, n4, n8, n16, n32, n64, n128} |
| <i>maxNumPreambleAttempt</i> | {n3, n4, n5, n6, n7, n8, n10} |
| <i>ra-ResponseWindowSize</i> | {pp2, pp3, pp4, pp5, pp6, pp7, pp8, pp10} |
| <i>mac-ContentionResolutionTimer</i> | {pp1, pp2, pp3, pp4, pp8, pp16, pp32, pp64} |
| <i>npdcch-NumRepetitions-RA</i> | {r1, r2, r4, r8, r16, r32, r64, r128, r256, r512, r1024, r2048} |
| <i>T300</i> | {ms2500, ms4000, ms6000, ms10000, ms15000, ms25000, ms40000, ms60000} |

Tabla 2. Resumen de los canales físicos de NB-IoT.

Fuente: (Brito, Baracat, & Sapucaí, 2018).

4.4. RENDIMIENTO DEL RACH

4.4.1. PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO

4.4.1.1. PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO EN r_{max}

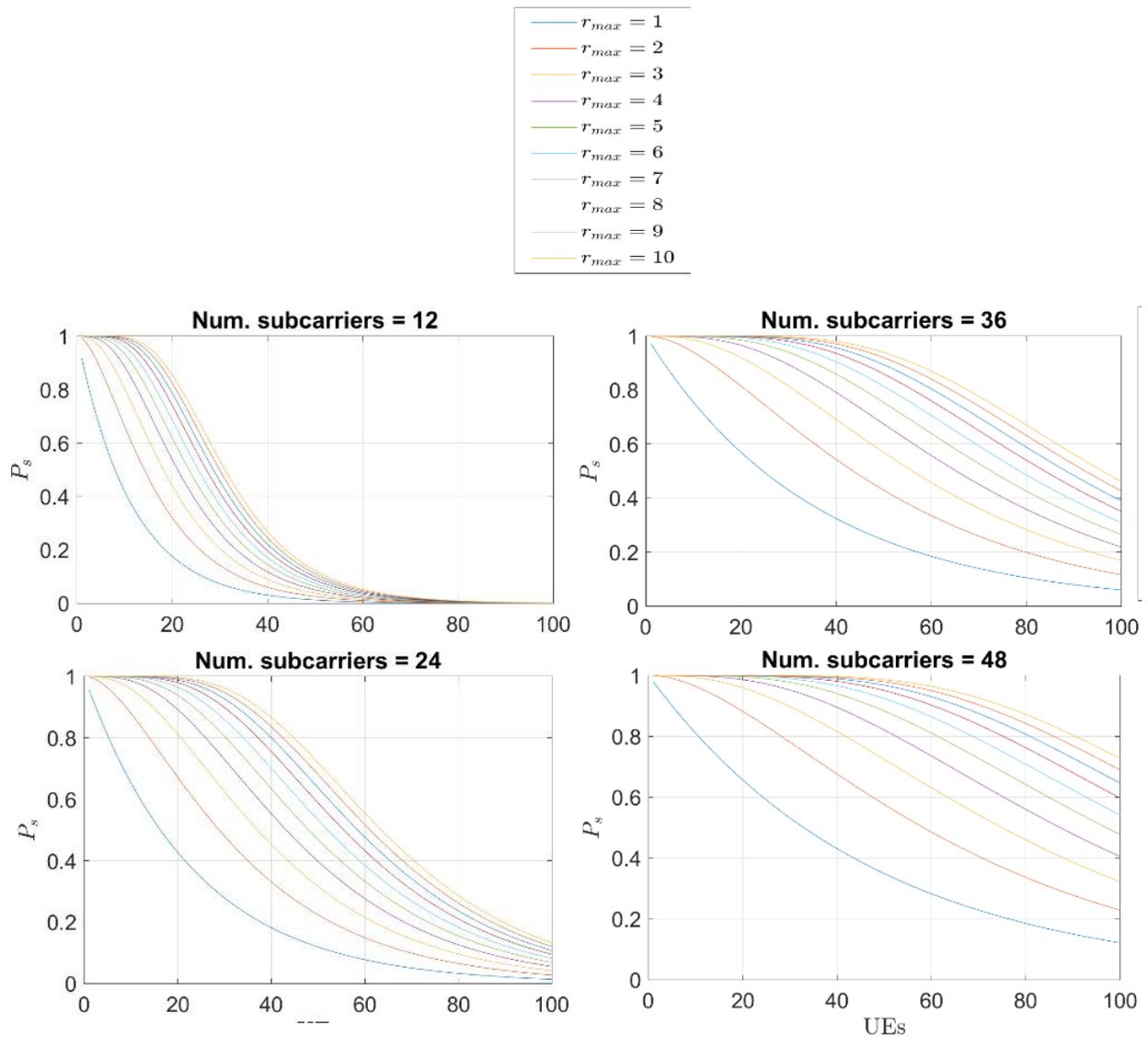


Figura 12. Probabilidad de acceso satisfactorio (P_s) en función de diferentes demandas de tráfico M2M activos y valores de Num.subcarriers establecidos en ($n=12$, $n=24$, $n=36$ y $n=48$) para diferentes valores de número máximo de intentos de transmisión del preámbulo (r_{max}).

Fuente: Autor.

La **Figura 12** muestra la probabilidad de acceso satisfactorio (P_s) generado en cada r_{max} , por tanto, para el análisis del indicador se toma diferentes intervalos de configuración RACH como se muestra en la **Tabla 3**, **Tabla 4** y **Tabla 5**.

| UEs | Num.subcarriers | Probabilidad de acceso satisfactorio (P_s) | | |
|-----|-----------------|--|-------------|--------------|
| | | $r_{max=3}$ | $r_{max=7}$ | $r_{max=10}$ |
| 100 | 12 | 0 | 0 | 0 |
| 100 | 24 | 0.04 | 0.09 | 1 |
| 100 | 36 | 0.16 | 0.35 | 0.46 |
| 100 | 48 | 0.32 | 0.60 | 0.72 |

Tabla 3. Probabilidad de acceso satisfactorio (P_s) en $r_{max} = 3$, $r_{max} = 7$ y $r_{max} = 10$, con 12, 24, 36 y 48 Num.subcarrier para 100 UEs activos.

Fuente: Autor.

Para analizar la probabilidad de acceso satisfactorio registrado en la **Tabla 3** tomamos los datos que tienen $P_s \geq 0.9$ debido que, a este rango se considera fiable la transmisión, caso contrario, tomamos el dato con mayor P_s que registre la **Tabla 13**. En este caso, se registra $P_s = 0.72$ en $r_{max} = 10$, con 48 Num.subcarriers para 100 UEs.

Este resultado indica que el 72% de 100 UEs del tráfico M2M obtuvieron una respuesta satisfactoria en la secuencia del preámbulo durante la ventana de respuesta; sin embargo, el 28% del tráfico falló en el acceso del RACH. También cabe mencionar que se obtuvo $P_s = 0.72$ en configuraciones con un valor máximo de r_{max} .

| UEs | Num.subcarriers | Probabilidad de acceso satisfactorio (P_s) | | |
|-----|-----------------|--|-------------|--------------|
| | | $r_{max=3}$ | $r_{max=7}$ | $r_{max=10}$ |
| 50 | 12 | 0.04 | 0.09 | 0.12 |
| 50 | 24 | 0.31 | 0.59 | 0.71 |
| 50 | 36 | 0.57 | 0.86 | 0.93 |
| 50 | 48 | 0.72 | 0.95 | 0.98 |

Tabla 4. Probabilidad de acceso satisfactorio (P_s) en $r_{max} = 3$, $r_{max} = 7$ y $r_{max} = 10$, con 12, 24, 36 y 48 Num.subcarrier para 50 UEs activos.

Fuente: Autor

Para analizar la probabilidad de acceso satisfactorio registrado en la **Tabla 4** se debe tomar en cuenta los parámetros mencionados anteriormente. Se registra la mayor probabilidad de acceso satisfactorio en $r_{max} = 10$, con $Ps = 0.98$ para 48 *Num.subcarriers*, seguido de $Ps = 0.95$ en $r_{max} = 7$, con 48 *Num.subcarriers* y finalmente con $Ps = 0.93$ en $r_{max} = 10$ para 36 subportadoras.

De acuerdo con los datos obtenidos, podemos observar que $r_{max} = 10$ registra la mayor probabilidad de acceso satisfactorio de 0.98, es decir que el 2% del tráfico M2M no accedieron satisfactoriamente; sin embargo, opera con valores máximos de configuración del RACH. También se registra que, en $r_{max} = 7$, el 5% del tráfico M2M tiene fallo de acceso en el RACH, pero opera con menor número de intentos. Finalmente se registra una probabilidad de acceso satisfactorio de 0.93 en $r_{max} = 10$, en el que utiliza menos subportadoras a diferencia de los casos anteriores, pero del tráfico activo, el 7% de dispositivos M2M no culmina satisfactoriamente el RAP.

Para analizar la probabilidad de acceso satisfactorio registrado en la **Tabla 5** cabe mencionar que se debe tomar en cuenta los parámetros indicados anteriormente.

| UEs | Num.subcarriers | Probabilidad de acceso satisfactorio (Ps) | | |
|-----|-----------------|---|-------------|--------------|
| | | $r_{max=3}$ | $r_{max=7}$ | $r_{max=10}$ |
| 10 | 12 | 0.80 | 0.97 | 0.99 |
| 10 | 24 | 0.96 | 0.99 | 0.99 |
| 10 | 32 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |
| 10 | 48 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |

Tabla 5. Probabilidad de acceso satisfactorio (Ps) en $r_{max} = 3$, $r_{max} = 7$ y $r_{max} = 10$, con 12, 24, 36 y 48 *Num.subcarrier* para 10 UEs activos.

Fuente: Autor.

De acuerdo con los datos obtenidos en la **Tabla 5**, se registra que, en las diferentes configuraciones (excepto en $r_{max} = 3$ con 12 *Num.Subcarriers*) hay una probabilidad de acceso satisfactorio ≥ 0.9 ; por tanto, se tendrá que evaluar posteriormente el retardo promedio para estas configuraciones en las que la transmisión se puede considerar fiable.

Una vez conocido en la configuración de parámetros que permiten una transmisión fiable, se evalúa posteriormente el retardo promedio en cada uno de los casos.

4.4.1.2. PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO EN LAS SUBPORTADORAS.

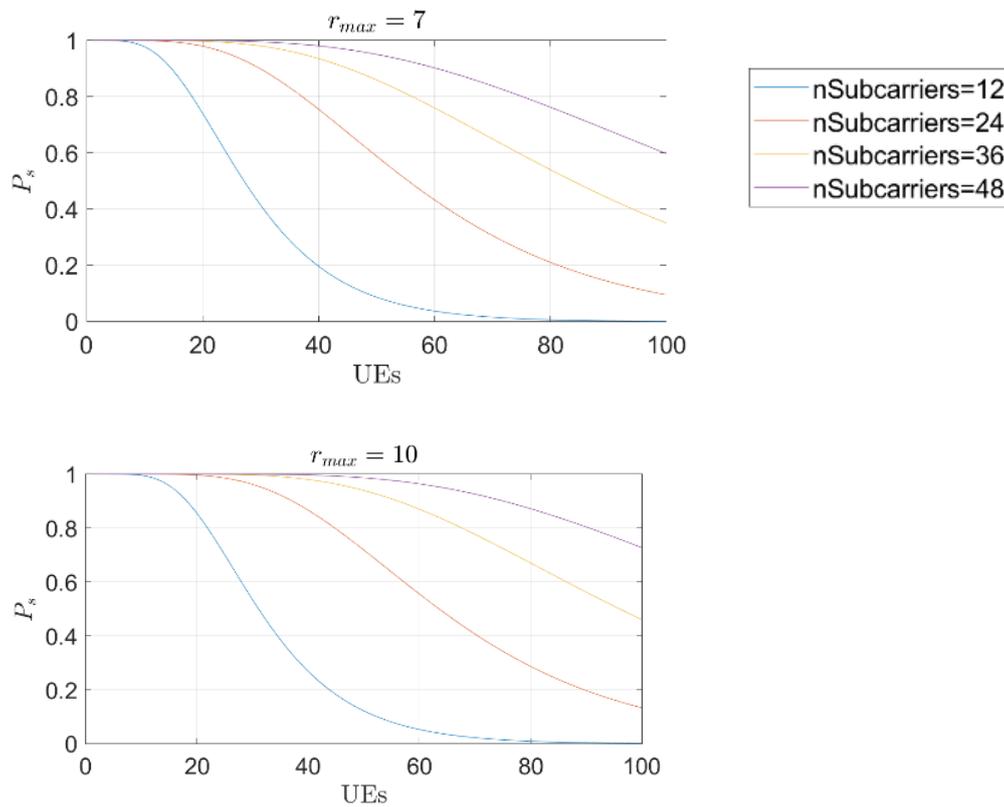


Figura 13. Probabilidad de acceso satisfactorio (P_s) en función de diferentes demandas de tráfico M2M activos con número de intentos máximos (r_{max}), para diferentes valores de subportadoras (Num.subcarriers) establecidos en ($n=12$, $n=24$, $n=36$ y $n=48$).

Fuente: Autor.

La **Figura 13** muestra la probabilidad de acceso satisfactorio (P_s) generado en cada $Num.subcarrier$; por tanto, para el análisis del indicador se toma diferentes intervalos de configuración RACH como se muestra en la **Tabla 6**, **Tabla 7** y **Tabla 8**.

Para analizar la probabilidad de acceso satisfactorio registrado en las diferentes tablas, tomamos los datos que tienen $P_s \geq 0.9$ debido a que, en este rango se considera fiable el rendimiento del RACH, caso contrario, tomamos el dato con mayor P_s que registra la tabla.

| UEs | r_{max} | Probabilidad de acceso satisfactorio (Ps) con Num.subcarriers | | | |
|-----|-----------|--|------|------|------|
| | | n=12 | n=24 | n=36 | n=48 |
| 100 | 3 | 0 | 0.04 | 0.16 | 0.32 |
| 100 | 7 | 0 | 0.09 | 0.35 | 0.60 |
| 100 | 10 | 0 | 1 | 0.46 | 0.72 |

Tabla 6. Probabilidad de acceso satisfactorio para subportadoras establecidos ($n=12$, $n=24$, $n=36$ y $n=48$) en función de 100 UEs activos con oportunidades de acceso máximo definidos como $r_{max} = 3$, $r_{max} = 7$ y $r_{max} = 10$.

Fuente: Autor.

La **Tabla 6** muestra la probabilidad de acceso satisfactorio en las diferentes subportadoras, se registra mayor probabilidad de acceso satisfactorio en $Num.subcarriers = 48$, con $Ps = 0.72$ para $r_{max} = 10$. Este resultado indica que, de 100 UEs el 72% de este tráfico M2M obtuvieron una respuesta satisfactoria en la secuencia del preámbulo durante la ventana de respuesta; sin embargo, el 28% del tráfico M2M falló en el acceso del RACH. También cabe mencionar que, se obtuvo $Ps=0.72$ con el valor máximo de intentos $r_{max} = 10$.

| UEs | r_{max} | Probabilidad de acceso satisfactorio (Ps) con Num.subcarriers | | | |
|-----|-----------|--|------|------|------|
| | | n=12 | n=24 | n=36 | n=48 |
| 50 | 3 | 0.04 | 0.31 | 0.57 | 0.72 |
| 50 | 7 | 0.09 | 0.59 | 0.86 | 0.95 |
| 50 | 10 | 0.12 | 0.71 | 0.93 | 0.98 |

Tabla 7. Probabilidad de acceso satisfactorio para subportadoras establecidos ($n=12$, $n=24$, $n=36$ y $n=48$) en función de 50 UEs activos con oportunidades de acceso máximo definidos como $r_{max} = 3$, $r_{max} = 7$ y $r_{max} = 10$.

Fuente: Autor.

Para analizar la probabilidad de acceso satisfactorio registrado en la **Tabla 7**, se debe tomar en cuenta los parámetros mencionados anteriormente. Se registra la mayor probabilidad de acceso satisfactorio en $Num.subcarriers = 48$, con $Ps = 0.98$ para 10 oportunidades de acceso.

Posteriormente, en $Num.subcarriers = 48$ se registra una $Ps = 0.95$ con $7 r_{max}$ y finalmente se registra una probabilidad de acceso satisfactorio de 0.93 en $Num.subcarriers = 36$ para $r_{max} = 10$, mientras que los escenarios restantes no obtienen una probabilidad de acceso satisfactorio ≥ 0.9 .

De acuerdo con los resultados obtenidos, se obtiene una probabilidad de acceso satisfactorio de 98% cuando el número de subportadoras como de intentos del preámbulo han alcanzado valores máximos de configuración; sin embargo, el 2% de UEs no logran culminar el RAP. Posteriormente se registra una $Ps = 0.95$ en el valor máximo de las subportadoras, pero con menor número de intentos, aunque el 5% de UEs no culminan satisfactoriamente el RAP. Finalmente se obtiene una $Ps = 0.93$ para menor número de subportadoras y valores máximos de intentos del preámbulo. Es necesario analizar todas estas acotaciones, para identificar en qué condiciones es fiable el rendimiento del RACH.

De acuerdo con los resultados analizados se observa que, la probabilidad de acceso satisfactorio incrementa cuando el número de subportadoras es mayor que el número de UEs activos; sin embargo, cuando el número de subportadoras es inversamente proporcional para el número de UEs activos, pero con mayor número de intentos para el preámbulo entonces la probabilidad de acceso satisfactorio es mayor. En la sección 4.4.2 se analiza el retardo promedio para cada una de las configuraciones, entonces, se definirá en que escenario es fiable el rendimiento del RACH.

| UEs | r_{max} | Probabilidad de acceso satisfactorio (Ps) con Num.subcarriers | | | |
|-----|-----------|--|------|------|------|
| | | n=12 | n=24 | n=36 | n=48 |
| 10 | 3 | 0.80 | 0.96 | 0.99 | 0.99 |
| 10 | 7 | 0.97 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |
| 10 | 10 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |

Tabla 8. Probabilidad de acceso satisfactorio para subportadoras establecidos ($n=12$, $n=24$, $n=36$ y $n=48$) en función de 10 UEs activos con oportunidades de acceso máximo definidos como $r_{max} = 3$, $r_{max} = 7$ y $r_{max} = 10$.

Fuente: Autor.

Para analizar la probabilidad de acceso satisfactorio registrado en la **Tabla 8** cabe mencionar que se debe tomar en cuenta los parámetros indicados anteriormente.

De acuerdo con los datos obtenidos en la **Tabla 8**, se registra que, en las diferentes configuraciones excepto en $Num.subcarrier = 12$ con $r_{max} = 3$ hay una probabilidad de acceso satisfactorio ≥ 0.9 ; por tanto, se tendrá que evaluar posteriormente el retardo promedio para estas diferentes configuraciones en las que la comunicación es fiable en el rendimiento del RACH.

REPRESENTACIÓN GRÁFICA TRIDIMENSIONAL DE PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO

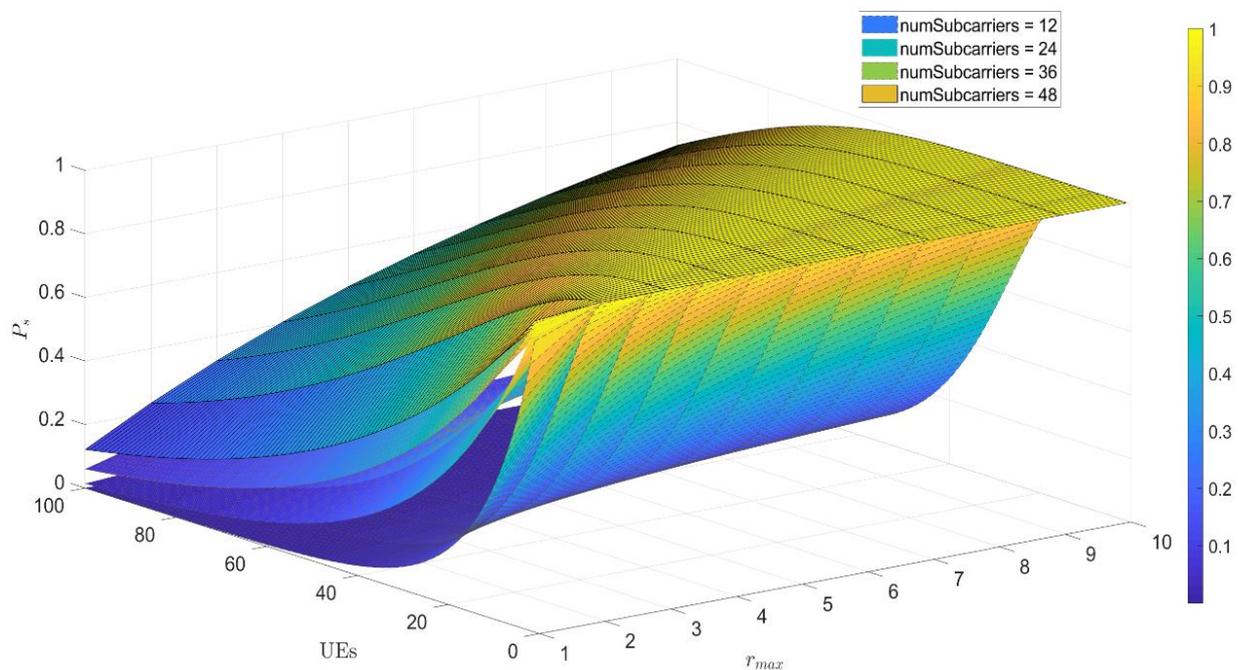


Figura 14. Probabilidad de acceso satisfactorio (P_s) en función de diferentes demandas de tráfico M2M activos con diferentes valores de intentos del preámbulo (r_{max}) para valores de $Num.subcarriers$ establecidos en ($n=12$, $n=24$, $n=36$ y $n=48$).

Fuente: Autor.

La **Figura 14** muestra una representación gráfica tridimensional de la probabilidad de acceso satisfactorio para cada grupo de subportadoras con diferentes configuraciones del RACH. De acuerdo con los resultados obtenidos en $Num.subcarriers = 12$ se determina que, a partir de 7

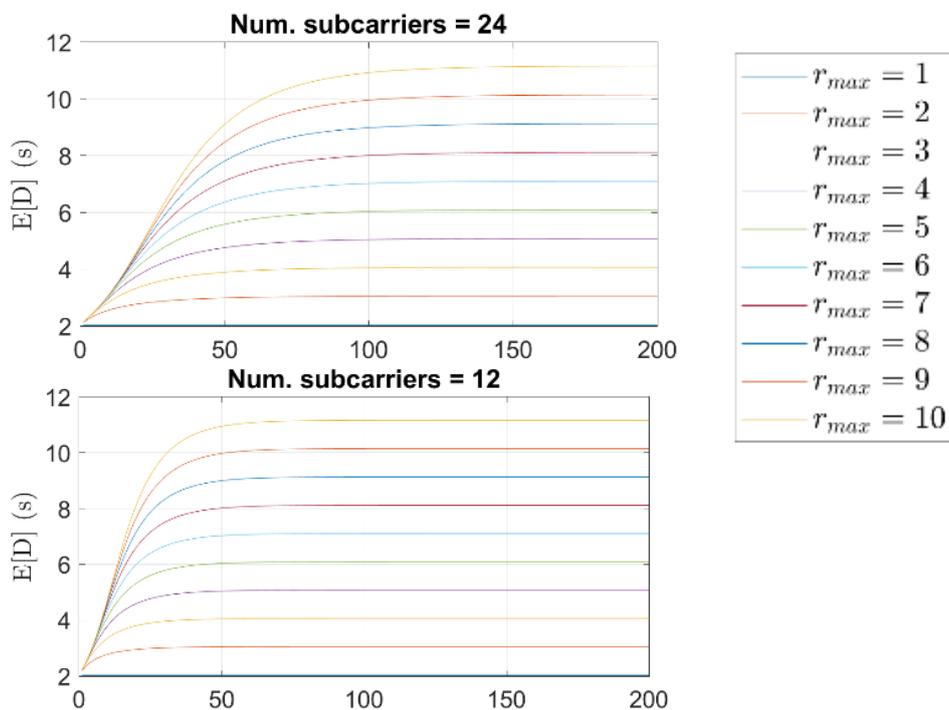
intentos del preámbulo con un tráfico máximo de 10 UEs se obtiene una probabilidad de acceso satisfactorio ≥ 0.96 ; por tanto, la P_s será menor si el tráfico UEs es mayor a 10.

La probabilidad de acceso satisfactorio empieza a incrementa para 50 UEs en la subportadora $Num.subcarriers = 36$, obteniendo una $P_s = 0.93$ con 10 intentos de acceso del preámbulo; sin embargo, la probabilidad de acceso satisfactorio es mejor en $Num.subcarriers = 48$, con $P_s = 0.95$ para máximo 7 intentos de transmisión del preámbulo. También se registra una probabilidad satisfactoria mayor que 0.9 para 75 usuarios en la curva $Num.subcarriers = 48$ con máximo 10 intentos de transmisión del preámbulo.

De acuerdo con el análisis general en la **Figura 14** , se observa claramente que P_s es mayor a mayor número de subportadoras y mayor número de intentos del preámbulo para el RAP.

4.4.2. RETARDO EN EL ACCESO

4.4.2.1. RETARDO PROMEDIO EN EL ACCESO PARA NÚMERO DE INTENTOS DEL PREÁMBULO.



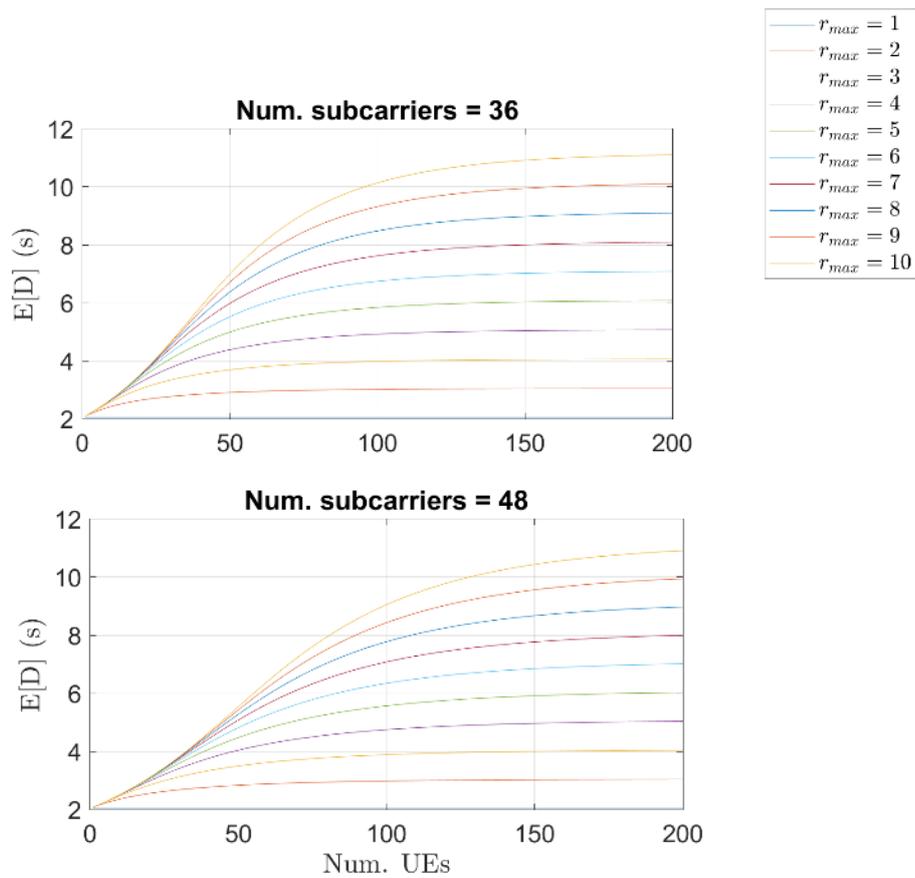


Figura 15. Retardo promedio $E[D](s)$ en función del número de UEs para diferentes valores de r_{max} y número de subportadoras.

Fuente: Autor.

La **Figura 15** muestra el retardo promedio $E[D](s)$ generado en cada r_{max} para diferentes números de subportadoras; por tanto, de acuerdo al análisis realizado en la sección de probabilidad de acceso satisfactorio, se estableció diferentes escenarios a evaluar su retardo promedio $E[D](s)$, para definir el retardo promedio en escenarios cuando la transmisión es fiable en el RACH.

TABLA RESUMEN

| UEs | Num.subcarriers | Retardo promedio E[D](s) | | |
|-----|-----------------|--------------------------|-------------|--------------|
| | | $r_{max=3}$ | $r_{max=7}$ | $r_{max=10}$ |
| 10 | 12 | 3.1 | 4.5 | 4.6 |
| 10 | 24 | 2.9 | 3 | 3.1 |
| 10 | 36 | 2.7 | 2.7 | 2.7 |
| 10 | 48 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |

Tabla 9. Retardo promedio en el acceso $E[D](s)$ en función de 10 UEs activos M2M y 4 grupos Num.subcarriers para $r_{max} = 3$, $r_{max} = 7$ y $r_{max} = 10$.

Fuente: Autor.

De acuerdo a la **Tabla 5** se establece que en las diferentes configuraciones excepto en $r_{max} = 3$ con 12 Num.Subcarriers hay una probabilidad de acceso satisfactorio ≥ 0.9 , entonces, de acuerdo a la **Tabla 9** registra el retardo promedio en el acceso $E[D](s)$ para cada una de estas configuraciones.

Se reporta que en $r_{max} = 3$ para 48 Num.subcarrier presenta $E[D](s) = 2.5s$ y una $Ps = 0.99$, entonces podemos establecer que este escenario opera con parámetros de eficiencia mejor con referencia a los diferentes escenarios.

| UEs | Num.subcarriers | Retardo promedio E[D](s) | | |
|-----|-----------------|--------------------------|-------------|--------------|
| | | $r_{max=3}$ | $r_{max=7}$ | $r_{max=10}$ |
| 50 | 12 | 4 | 8 | 11 |
| 50 | 24 | 3.99 | 7.1 | 9.1 |
| 50 | 36 | 3.7 | 6 | 7.1 |
| 50 | 48 | 3.5 | 5.1 | 5.7 |

Tabla 10. Retardo promedio en el acceso $E[D](s)$ en función de 50 UEs activos M2M y 4 grupos Num.subcarriers. para $r_{max}=3$, $r_{max}=7$ y $r_{max}=10$.

Fuente: Autor.

Al evaluar el retardo promedio en el acceso $E[D](s)$ para los diferentes escenarios establecidos en la **Tabla 4**, se registra tres resultados con mejor característica de eficiencia en el acceso

satisfactorio como son: $r_{max} = 7$ con $Ps = 0.95$ para $Num.subcarrier = 48$ se presenta un $E[D](s) = 5.1s$, para $r_{max} = 10$ con $Ps = 0.93$ para $Num.subcarrier = 36$ se registra $E[D](s) = 7.1s$ y finalmente en $r_{max} = 10$ con $Ps = 0.98$ para $Num.subcarrier = 48$ tiene $E[D](s) = 5.7s$.

Para el análisis de los diferentes escenarios, se debe considerar parámetros de eficiencia tales como: operar con menos recursos, baja latencia y $Ps \geq 0.9$. Entonces, de acuerdo con estas condiciones podemos establecer que $r_{max} = 10$ con 48 $Num.subcarrier$, no se considera como mejor escenario para el rendimiento del RACH debido que el retardo es mayor en comparación con otros escenarios. Pero con $r_{max} = 7$ y $Ps = 0.95$ opera con menos subportadoras y menor latencia; sin embargo, la probabilidad satisfactoria es menor que el anterior escenario, pero opera dentro del rango fiable de rendimiento de la red.

| UEs | Num.subcarriers | Retardo promedio E[D](s) | | |
|-----|-----------------|--------------------------|-------------|--------------|
| | | $r_{max=3}$ | $r_{max=7}$ | $r_{max=10}$ |
| 100 | 12 | 4.05 | 8.05 | 11.05 |
| 100 | 24 | 4.02 | 8 | 11 |
| 100 | 36 | 4 | 7.7 | 10.08 |
| 100 | 48 | 3.95 | 7.1 | 9.1 |

Tabla 11. Retardo promedio en el acceso $E[D](s)$ en función de 100 UEs activos M2M y 4 grupos $Num.subcarriers$. para $r_{max}=3$, $r_{max}=7$ y $r_{max}=10$.

Fuente: Autor.

Para el análisis de los resultados obtenidos en la **Tabla 11** se requiere conocer la probabilidad de acceso satisfactorio detallado en la **Tabla 3**. Se registra una probabilidad de acceso satisfactorio en $r_{max} = 10$ con $Ps = 0.72$ para $Num.subcarrier=48$ el cual tiene un $E[D]= 9.1s$. Esto denota un retardo de acceso promedio alto debido al gran número de dispositivos activos y baja disponibilidad de subportadoras libres para que accedan los preámbulos al proceso del RAP.

4.4.2.2. RETARDO PROMEDIO EN EL ACCESO

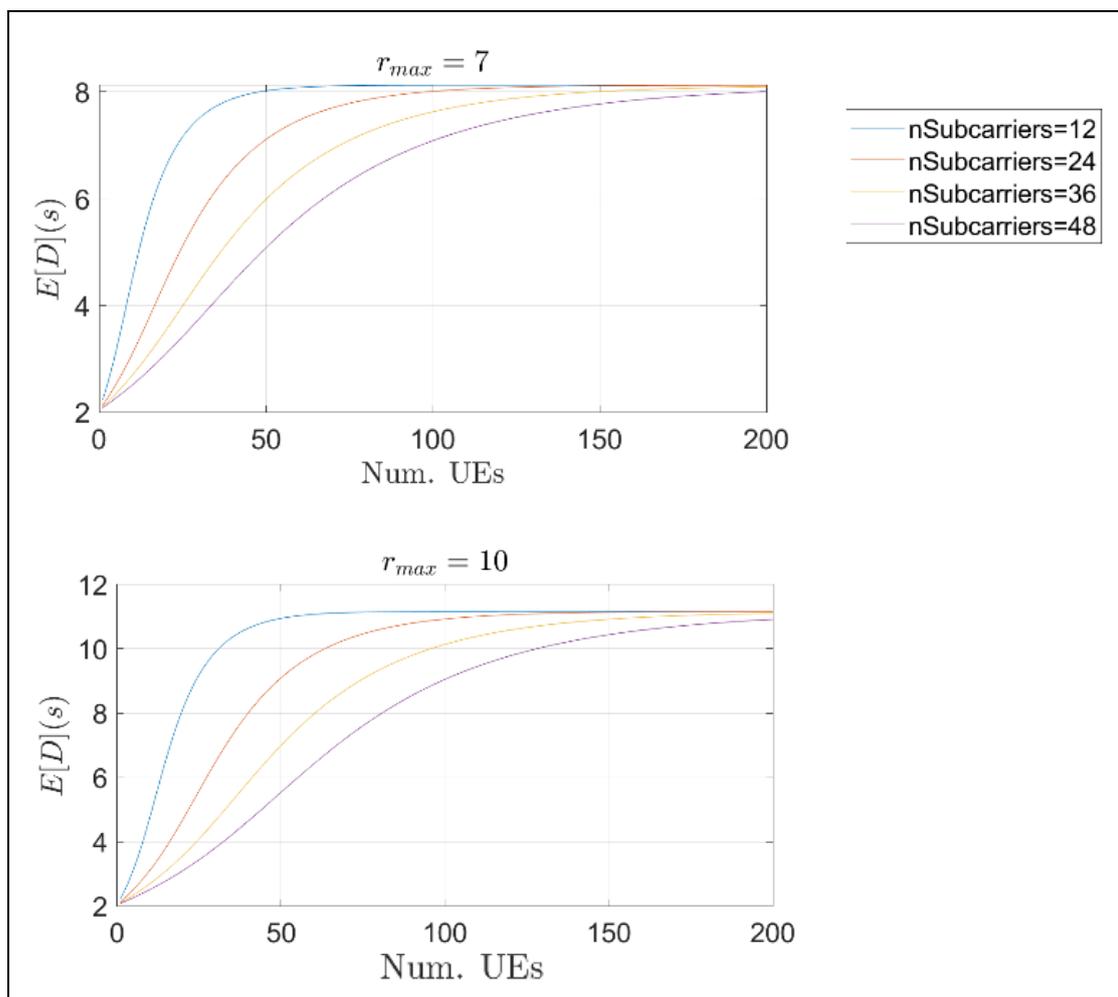


Figura 16. Retardo promedio en función de usuarios para diferentes valores de intentos en el preámbulo ($r_{max} = 7$ y $r_{max}=10$) y número de subportadoras.

Fuente: Autor.

Para el análisis del retardo promedio en el acceso $E[D](s)$ en las subportadoras, se ubica casos de probabilidad de acceso satisfactorio en el RACH que obtenga mayor demanda de tráfico, entonces, de acuerdo a los resultados obtenidos en la **Tabla 6** y **Tabla 7** se registra para 50 UEs de M2M en: $Num.subcarrier = 48$ con $P_s = 0.98$ para $r_{max} = 10$, obteniendo $E[D](s) = 5.7s$, seguido de $Num.subcarrier = 48$ con $P_s = 0.95$ para $r_{max} = 7$ se registra $E[D](s) = 5.1s$; finalmente en $Num.subcarrier = 36$ con $P_s = 0.93$ tiene $E[D](s) = 7.1s$ para $r_{max} = 10$.

Para 100 UEs se registra en $Num.subcarrier = 48$ con $P_s = 0.72$ obteniendo $E[D](s) = 9.1s$ para $r_{max} = 10$.

$E[D](s)$ varía notablemente en cada uno de los casos registrados, estas alteraciones se deben al incremento de tráfico M2M y menor número de subportadoras libres para transmitir los preámbulos; por tanto, se requiere mayor número de intentos para un acceso satisfactorio en el RAP.

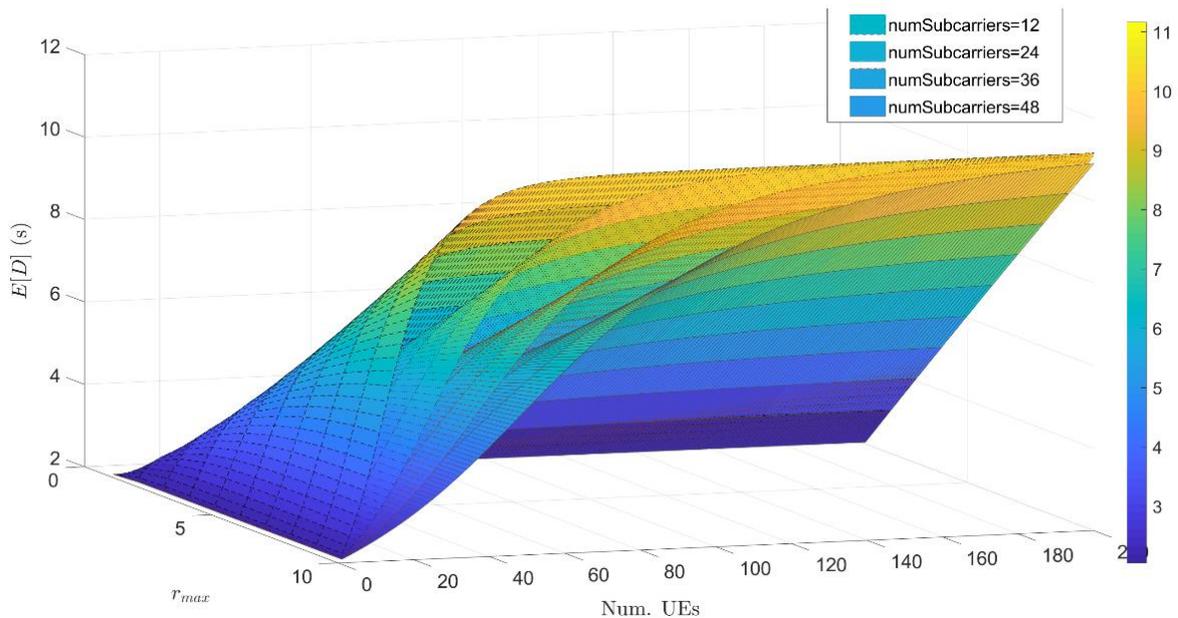


Figura 17. Retardo promedio en función de número de usuarios, número máximo de transmisiones de preámbulo y número de subcarriers.

Fuente: Autor.

En la **Figura 17** se observa de manera más detallada el comportamiento de los intervalos de retardo promedio para cada una de las subportadoras. Se registra que el $E[D](s)$ incrementa a medida que el número de UEs activos aumenta. Para el escenario de $Num.subcarrier = 12$ se reporta mayor número de intervalos de retardo promedio en el acceso, como era de suponerse que el tráfico de usuarios es mayor que las subportadoras dando como resultado colisiones en la red y por lo tanto retardos en el acceso; sin embargo, para 10UEs de M2M el retardo es menor en la transmisión.

COMPARATIVA DE ESCENARIOS CON INTERVALOS DE RESPUESTA ÓPTIMA.

| UEs | r_{max} | Num.subcarrier | Ps | E[D](s) | UEs transmitidos |
|-----|-----------|----------------|------|---------|------------------|
| 10 | 3 | 36 | 0.99 | 2.7 | 9 o 10 |
| 50 | 7 | 48 | 0.95 | 5.1 | 48 |
| 75 | 10 | 48 | 0.92 | 7.5 | 69 |
| 100 | 10 | 48 | 0.72 | 9.1 | 72 |

Tabla 12. Comparativa de escenarios con intervalos de respuesta óptima

Fuente: Autor.

De acuerdo con los resultados analizados en los distintos escenarios, podemos establecer que, para un tráfico ≤ 75 UEs la probabilidad de acceso satisfactorio en el RACH es $P_s > 0.9$. Se puede observar que, a medida que el tráfico de UEs aumenta se requiere mayor número de subportadoras como de intentos en el preámbulo, mientras que, para un tráfico M2M > 75 la probabilidad de acceso satisfactorio < 0.9 . Esto ocurre porque el número de subportadoras libres de n disponibles es menor; entonces, comienza a generar congestión en la red y por lo tanto aumentar el número de UEs que no transmiten satisfactoriamente.

Para diferentes respuestas de probabilidad de acceso satisfactorio $P_s > 0.9$ se analizó el retardo producido para cada uno de ellos, posteriormente se extrajo los escenarios con menor retardo promedio en su acceso. Entonces, para un $P_s = 0.92$ con un tráfico de 75 UEs se produce un $E[D](s) = 7.5s$, lo que significa que el retardo promedio es proporcional al número de intentos del preámbulo.

CAPÍTULO V.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES CONCLUSIONES

5.1. CONCLUSIONES

El proyecto de investigación mostró el impacto de los parámetros que están directamente relacionados con el procedimiento de acceso satisfactorio (RAP) en la tecnología NB-IoT para obtener indicadores como: probabilidad de acceso satisfactorio (P_s) y el retardo promedio en el acceso.

Con relación a P_s , se considera como escenarios de interés aquellos en los que $P_s \geq 0.9$ para que la transmisión sea fiable. En estos escenarios se evaluaron los parámetros RACH con el fin de identificar el escenario que opere con menos recursos.

De acuerdo a la **Tabla 12**, se obtiene $P_s = 0.99$ para un tráfico de 10 UEs, con menor número de subportadoras ($Num.Subcarrier = 36$) y menor número intentos ($r_{max} = 3$), mientras que para un tráfico de 50 y 75 UEs también se obtiene $P_s > 0.90$. Sin embargo, en estos casos la red opera con valores máximos de subportadoras ($Num.Subcarrier = 48$) pero con menor intervalo de r_{max} . Finalmente se registra $P_s = 0.72$ en intervalos máximos transmisión de preámbulo como subportadoras ($r_{max} = 10$ y $Num.Subcarrier = 48$) para 100 usuarios.

Se concluye que, para escenarios en el que el número de UEs es ≤ 75 , se obtiene un $P_s > 0.9$, es decir que, dentro de este rango se puede conseguir una transmisión fiable, mientras que para valores del número de UEs en contienda > 75 , P_s es menor; es decir que, se incrementará el número de UEs que no consigan una transmisión exitosa en el RAP. Entonces, la probabilidad de acceso satisfactorio es proporcional al número de subportadoras y al número de intentos del preámbulo.

Con respecto al retardo promedio $E[D](s)$ para los escenarios de: 10UEs , 50 UEs, 75UEs y 100 UEs seleccionados con sus parámetros respectivos en la **Tabla 12** se observa que, cuando el número de UEs en contienda es ≤ 75 , se obtiene un retardo promedio $> 7.5s$; este efecto se produce debido al mayor número de subportadoras y mayor número de intentos del preámbulo. Para 100 UEs se obtiene un $E[D](s) = 9.1s$; entonces, $E[D](s)$ es directamente proporcional al número subportadoras y número máximo de intentos de transmisión del preámbulo.

Se concluye que, el canal de acceso aleatorio (RACH) en la tecnología NB-IoT tiene un rendimiento fiable (se logra transmitir más del 90% de los mensajes) en escenarios con 75 UEs en

contienda, utilizando 48 subportadoras con máximo 10 intentos en la transmisión del preámbulo, con un retardo promedio máximo de 7.5s en el RAP. Sin embargo, para escenarios con más de 100 usuarios M2M, el rendimiento del RACH no es fiable, porque solamente el 73% de transmisiones es exitoso.

Una vez analizados los resultados se concluye que el consumo de energía para el tráfico M2M va a ser mayor, debido al número de intentos ocasionados en el RAP. Esta tecnología es factible para aplicaciones tolerantes al retardo como Smart meters (medidores inteligentes).

5.2.RECOMENDACIONES

Se recomienda recopilar información actualizada sobre el funcionamiento del RACH en la tecnología NB-IoT considerando *Releases* del 3GPP mayores al 13. Esto permitirá desarrollar un modelo analítico para estimar la probabilidad de acceso satisfactorio y el retardo en el acceso.

Este proyecto de investigación es la base para buscar mecanismos de mejora en el rendimiento del RACH en la tecnología NB-IoT, de manera que se reduzca la latencia en la transmisión para que el consumo energético en los dispositivos sea menor y su vida útil sea mayor.

BIBLIOGRAFÍA

- Martiradonna, S., Grassi, A., Piro, G., Grieco, L., & Boggia, G. (n.d.). An open source platform for exploring NB-IoT. *IEEE*, 1-6.
- Ratasuk, R., Mangalvedhe, N., & Ghosh, A. (2015). Overview of LTE enhancements for cellular IoT. *CSCN*, 1.
- 3GPP. (2015). Narrowband IoT (NB-IoT). *IEEE*.
- 3GPP. (2018). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification (Release 13). *Technical Specification Group Radio Access Network*; 18-27.
- 3GPP. (n.d.). Narrowband IoT (NB-IoT).
- Agiwal, M., Maheshwari, M. K., & Jin, H. (2019). Power Efficient Random Access for Massive NB-IoT Connectivity. *MDPI*, 24.
- Antón Aro, C., & Dohler, M. (2015). Introduction to machine-to machine (M2M) communications. 20,21,22.
- AZOU , S., ABED MERAÏM , K., VIGNERON, V., HAMAD, D., YOUSSE, R., MANSOUR, A., & CLEMENT, B. (2018). Machine-to-Machine Communication Congestion Mechanism. 16,23.
- Barnett Jr, T., Jain, S., Andra, U., & Sumits, A. (2015). Cisco visual networking index update – Global mobile data traffic forecast 2014-2019. *Cisco Knowledge Network*.
- Brito, J., Baracat, H., & Sapucaí, R. (2018). NB-IoT Random Access Procedure Analysis. *IEEE*, 6. Retrieved from IEEE.
- Elkhodr, M., Cheung, H., & Shahrestani, S. (2016). Emerging Wireless Technologies in the Internet of Things : A Comparative Study. *IEEE*.
- Ericsson. (2019). NB-IoT and cat-M technologies will account for close. *Ericsson Mobility Report*, 8.
- Gartner. (2014). IT in 2020: Internet of Things, Digital Business Enthusiasm.
- Ghasempour, A. (2016). Optimized advanced metering infrastructure architecture of smart grid based on total cost, energy, and delay. *IEEE*.
- GPS, R.-5.-N. I.-I. (2019, 11 2). *icpdas*. Retrieved from icpdas: <http://m2m.icpdas.com/RTU-540P-NB.html?fbclid=IwAR3IOR4a0wX-Ml5npu7DB8JSt6bedy2n8Pyta3xFX9awGvLE4D1RvBwmpDM>

- GSMA. (June 2019). NB-IoT Deployment Guide To Basic Feature Set Requirements. 28.
- Harwahu, R., & Cheng, R.-G. (2017). Investigating the Performance of the Random Access. *IEEE*, 1.
- Harwahu, R., Cheng, R. G., & Wei, C.-H. (2017). Investigating the Performance of the Random Access. *IEEE*.
- L.Tello, I.Leyva, V.Pla, & J.Martinez-Bauset. (Abril.2018). Performance Analysis and Optimal Access Class Barring Parameter Configuration in LTE-A Networks With Massive M2M Traffic. *IEEE*, 1.
- Lin, X., Adhikary, A., & Wang, Y. (2016). Random Access Preamble Design and Detection for 3GPP Narrowband IoT Systems. *IEEE*.
- Moyano Jácome, M. G. (2017). Comunicación Máquina a Máquina Eficiente en LTE-A, Caso de Estudio: Trenes de Alta Velocidad. 4-6.
- POPLI, S., JHA, K., & JAIN, S. (2019). *IEE*, 16752.
- POPLI, S., KUMAR, R., & JAIN, S. (2019). A Survey on Energy Efficient Narrowband Internet of Things (NB-IoT): Architecture, Application and Challenges. *IEEE*, 16754.
- POPLI, S., KUMAR JHA, R., & JAIN, S. (2019). A Survey on Energy Efficient Narrowband Internet of Things (NB-IoT): Architecture, Application and Challenges. *IEEE*, 16752.
- Rapeepat, R., Nitin, M., & Amitava, G. (2015). Overview of LTE Enhancements for Cellular IoT. *IEEE*, 1.
- Ratasuk, R., Mangalvedhe, N., Zhang, Y., Robert, M., & Koskien, J. P. (2016). Overview of Narrowband IoT in LTE Rel-13. *IEEE*, 1.
- Schwarz, & Rohde. (2016). Narrowband Internet of Things. *GSA*, 9.
- Tello Oquendo, L., Leyva, I., Pla, V., Bauset, J., Vidal, J. R., Casares Giner, V., & Guijarro, L. (2017). Performance Analysis and Optimal Access Class Barring Parameter Configuration in LTE-A Networks With Massive M2M Traffic. *IEEE*, 3517-3518.
- WANG, E., BERGMAN, J., SACHS, J., LIBERG, O., & SUNDBERG, M. (2018). Cellular Internet of Things. 230.
- Winston, K. (2014). *Study.com*. Retrieved from Study.com:
<https://study.com/academy/lesson/exploratory-research-definition-methods-examples.html>

ANEXOS

ANEXO 1

PARÁMETROS DE CANALES FÍSICOS DE NB-IoT

| <i>Canal</i> | <i>Formato</i> | Δ_f | # subportadoras | <i>Duración</i> T | <i>Contenido</i> | <i>Modulación</i> | # de bits <i>b</i> |
|------------------|----------------|------------|--------------------|----------------------|------------------|-------------------|--------------------|
| <i>NPUSCH</i> | 1 | 3.75kHz | 1 | 32ms | 448 símbolos | {BPSK, QPSK} | {448, 896} |
| | 1 | 15 kHz | 1 | 8 ms | 112 símbolos | QPSK | 224 |
| | 1 | 15 kHz | 3 | | 168 símbolos | QPSK | 336 |
| | 1 | 15 kHz | 6 | 4 ms | 168 símbolos | QPSK | 336 |
| | 1 | 15 kHz | 12 | | 168 símbolos | | 336 |
| | 2 | 3.75kHz | 1 | 2 ms | 112 símbolos | | 112 |
| | 2 | 15 kHz | 1 | 1 ms 8 ms 2 ms | 28 símbolos | | 28 |
| <i>PREÁMBULO</i> | 0 | 3.75kHz | {12; 24; 36; 48} | 5.6 ms | | | |
| | 1 | 3.75kHz | {12; 24; 36; 48} | 6.4 ms | | | |
| | 2 | 1.25kHz | {12; 24; 36; 48} | 19.2 ms | | | |
| <i>NPDCCH</i> | 0 | 15 kHz | 6 | 0.5 ms | 1 CCE | | |
| | 1 | 15 kHz | 12 | 0.5 ms | 2 CCEs | | |
| <i>NPDSCH</i> | 1 | 15 kHz | | 0.5 ms | | | |

Tabla 13. Resumen de los parámetros de los canales físicos de NB-IoT.

Fuente: Autor.

ANEXO 2

PLOTS DE PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO

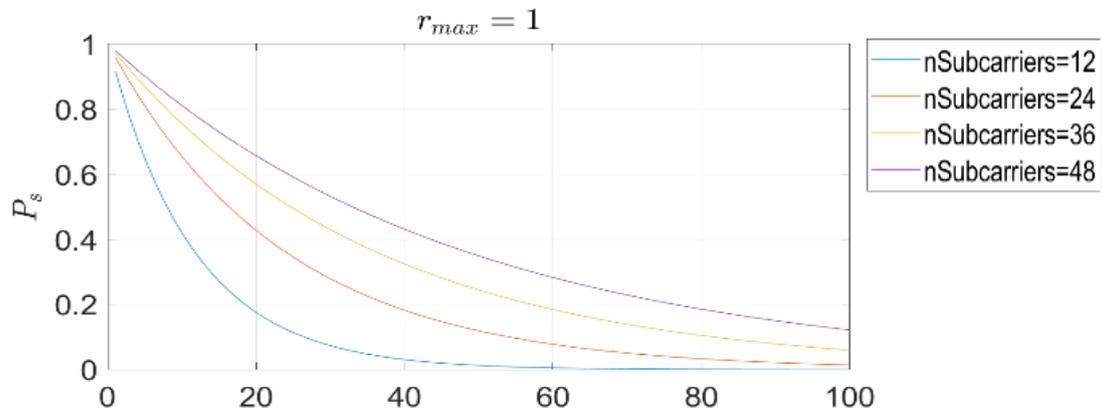


Figura 18. Probabilidad de acceso satisfactorio (P_s) en función de diferentes demandas de tráfico M2M activos con número de intentos máximos ($r_{max}=1$), para diferentes valores de subportadoras (Num.subcarriers) establecidos en ($n=12$, $n=24$, $n=36$ y $n=48$).

Fuente: Autor.

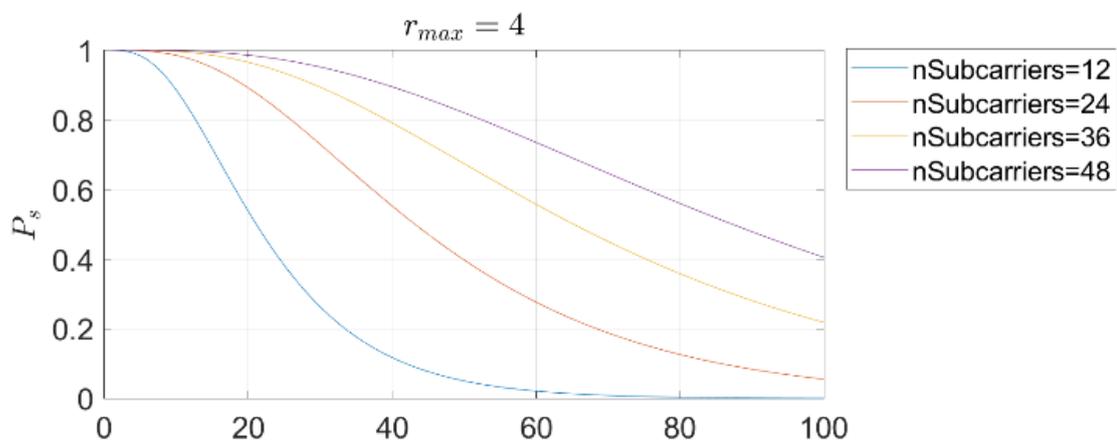


Figura 19. Probabilidad de acceso satisfactorio (P_s) en función de diferentes demandas de tráfico M2M activos con número de intentos máximos ($r_{max}=4$), para diferentes valores de subportadoras (Num.subcarriers) establecidos en ($n=12$, $n=24$, $n=36$ y $n=48$).

Fuente: Autor.

ANEXO 3

PLOTS DEL RETARDO PROMEDIO EN EL ACCESO.

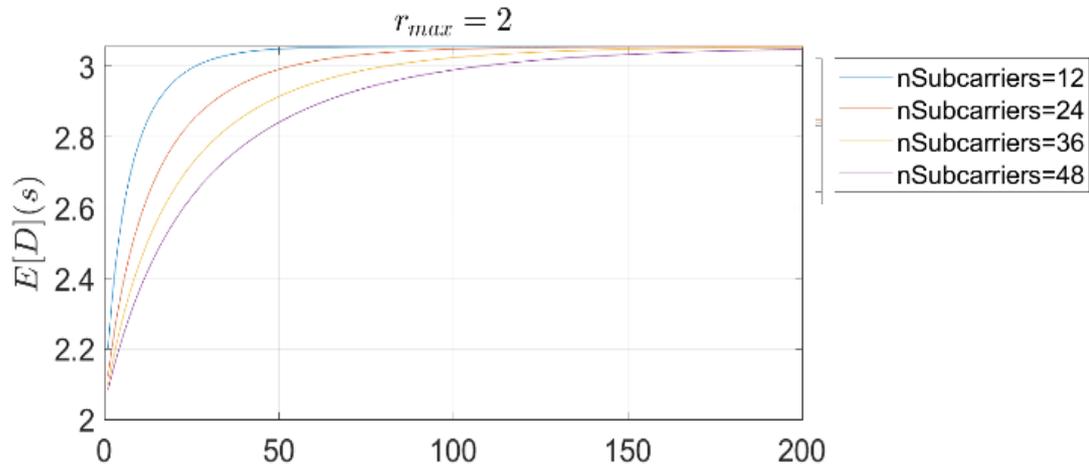


Figura 20. Retardo promedio en función de varios usuarios UEs para diferentes valores $r_{max}=2$ y diferentes valores de subportadoras (Num.subcarriers) establecidos en ($n=12$, $n=24$, $n=36$ y $n=48$).

Fuente: Autor.

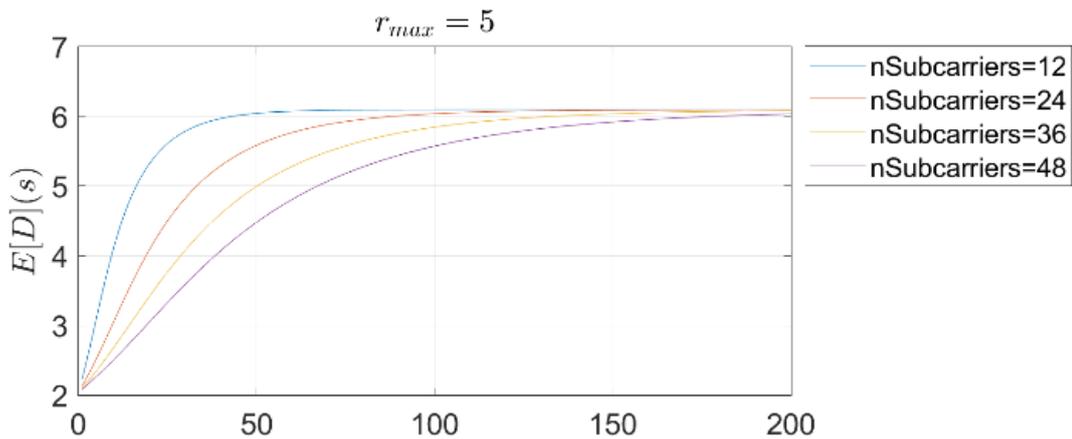


Figura 21. Retardo promedio en función de varios usuarios UEs para diferentes valores $r_{max}=5$ y diferentes valores de subportadoras (Num.subcarriers) establecidos en ($n=12$, $n=24$, $n=36$ y $n=48$).

Fuente: Autor.