

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

Proyecto de Investigación

**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**

Autor: Santiago Israel Castro López

Tutor: Ing. Luis Patricio Tello Oquendo, PhD.

Riobamba – Ecuador

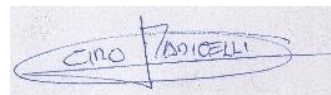
Año 2021

Los miembros del tribunal de graduación del proyecto de investigación de título: **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**, presentado por: **Santiago Israel Castro López**, 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

Ing. **Ciro Radicelli, PhD.**
Presidente del Tribunal



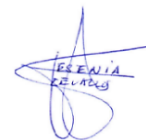
.....
Firma

Ing. **Alejandra Pozo, Mgs.**
Miembro del Tribunal



.....
Firma

Ing. **Yesenia Cevallos, PhD.**
Miembro del Tribunal



.....
Firma

DECLARACIÓN EXPRESA DE TUTORÍA

En calidad de tutor del tema de investigación: **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**, realizado por el Sr. **Santiago Israel Castro López**, 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, 19 de noviembre de 2021



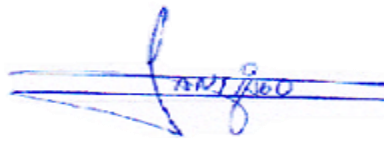
.....
Luis P. Tello Oquendo, PhD.

C.I 060423524-2

TUTOR

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

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

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Santiago', is written over two horizontal lines.

.....
Santiago Israel Castro López
C.I. 180480966-1

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I	15
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.1. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	15
1.2. OBJETIVOS	17
1.2.1. Objetivo general.	17
1.2.2. Objetivos específicos.	17
CAPÍTULO II	18
2. MARCO TEÓRICO	18
1.3. ESTADO DEL ARTE	18
1.4. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	20
1.4.1. NarrowBand - Internet of Things	20
1.4.2. Cobertura Mejorada Nb-IoT	23
1.4.3. Comunicaciones masivas de tipo máquina	24
1.4.4. NB-IoT en comunicaciones masivas de tipo máquina	25
1.4.5. NPRACH	26
1.4.6. Procedimiento de acceso aleatorio	28
1.4.7. Mecanismos de Control de Congestión	30
1.4.7.1. Access Class Barring	31
1.4.7.2. Back-off	32
CAPÍTULO III	33
3. METODOLOGÍA	33
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	33
3.1.1. Investigación exploratoria	33
3.1.2. Investigación experimental	33
3.2. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	34
3.2.1. Método descriptivo	34
3.2.2. Método experimental	34
3.2.3. Método analítico	34
3.3. TÉCNICAS	34
3.3.1. Observación	34
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA	35
3.4.1. Población	35

3.4.2. Muestra	35
3.5. FUENTES DE RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	35
3.6. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS	36
3.7. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	36
3.8. PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS	38
3.8.1. Parámetros de Información del Sistema NB-IoT	40
3.8.2. Factores de Configuración	41
3.8.2.1. Repeticiones	41
3.8.2.2. Access Class Barring	43
3.8.2.3. Ventana de Retroceso (Back-off)	45
3.8.2.4. Retransmisiones	46
3.8.2.5. División de subcanales	48
3.8.3. Modelo de Sistema NB-IoT	49
3.8.4. Mecanismo de control de congestión	52
CAPÍTULO IV	54
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
4.1. ENTORNO DE RED	54
4.2. OBTENCIÓN DE RESULTADOS	55
4.3. DISTRIBUCIÓN DE DISPOSITIVOS	55
4.4. PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO	56
4.5. TIEMPO DE ACCESO	68
CAPÍTULO V	73
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
5.1. CONCLUSIONES	73
5.2. RECOMENDACIONES	75
BIBLIOGRAFÍA	76
ANEXOS	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Procedimiento de acceso aleatorio que se produce entre un dispositivo y un nodo NB IoT.....	20
Figura 2. Modos de operación posibles en LTE. 2a) Modo estándar. 2b) Modo banda de guardia de LTE. 2c) Modo en banda uso del espectro LTE.....	22
Figura 3. Niveles de mejora de cobertura y numero de repeticiones por la pérdida de trayectoria	23
Figura 4. Pronóstico de cantidad de dispositivos M2M conectados a una red móvil masiva para 2023.....	25
Figura 5. Preámbulos NPRACH	27
Figura 6. Oportunidad de acceso aleatorio	27
Figura 7. Variables que intervienen en el procedimiento de acceso aleatorio.....	29
Figura 8. Procesamiento y análisis de la investigación.....	36
Figura 9. Mensajes del procedimiento aleatorio y canales utilizados para transmisión y recepción.....	39
Figura 10. Estructura del preámbulo NB-IoT.....	39
Figura 11. Selección del nivel de cobertura dependiendo de la señal de potencia recibida	43
Figura 12. Diagrama de flujo del mecanismo de restricción de acceso por clase ACB	45
Figura 13. Diagrama de flujo del mecanismo de Back-off	46
Figura 14. Diagrama de flujo entre el MSG-1 y MSG-2	48
Figura 15. Diseño del mecanismo de control de congestión	53
Figura 16. Entorno de red para la evaluación del mecanismo de control planteado	54
Figura 17. Distribución de dispositivos dentro de un área A de 300 Km ² mediante un proceso homogéneo de puntos independientes.....	56
Figura 18. Probabilidad de acceso satisfactorio en un solo nivel de cobertura y 3 retransmisiones, con y sin el mecanismo de control de congestión.	57
Figura 19. Probabilidad de acceso satisfactorio en un solo nivel de cobertura y cinco retransmisiones, con y sin el mecanismo de control de congestión.	58

Figura 20. Probabilidad de acceso satisfactorio en un solo nivel de cobertura y diez retransmisiones, con y sin el mecanismo de control de congestión.	59
Figura 21. Probabilidad de acceso satisfactorio en un solo nivel de cobertura y 64 repeticiones, con y sin el mecanismo de control de congestión.	62
Figura 22. Probabilidad de acceso satisfactorio en un solo nivel de cobertura y 128 repeticiones, con y sin el mecanismo de control de congestión.	63
Figura 23. Probabilidad de acceso satisfactorio en tres niveles de cobertura con diferentes valores de subportadoras en cada nivel.	64
Figura 24. Probabilidad de acceso satisfactorio en tres niveles de cobertura con distintos valores de repetición y retransmisión para cada nivel de cobertura.	65
Figura 25. Probabilidad de acceso satisfactorio en tres niveles de cobertura con el mecanismo de restricción de acceso habilitado con un umbral $\rho_{ACB} = 0.8$	66
Figura 26. Probabilidad de acceso satisfactorio en tres niveles de cobertura con el mecanismo de restricción de acceso habilitado con un umbral $\rho_{ACB} = 0.5$	67
Figura 27. Retardo en el tiempo de acceso en un solo nivel de cobertura con y sin el mecanismo de control de congestión	68
Figura 28. Retardo del tiempo de acceso en un solo nivel de cobertura con diferentes valores del mecanismo de back-off y la variable repeticiones y retransmisiones estable.	69
Figura 29. Retardo en el tiempo de acceso en un solo nivel de cobertura, con distintos valores del mecanismo de back-off, repeticiones y retransmisiones	70
Figura 30. Retardo en el tiempo de acceso para tres niveles de cobertura con valores óptimos en el escenario 1	70
Figura 31. Retardo en el tiempo de acceso para tres niveles de cobertura con valores óptimos en el escenario 2	71
Figura 32. Retardo en el tiempo de acceso para tres niveles de cobertura con valores óptimos en el escenario 3	72
Figura 33. Prueba de rendimiento del canal PDSCH con LTE Toolbox.....	78
Figura 34. Estructura de preámbulo NB-IoT con LTE Toolbox	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de las variables	37
Tabla 2. Parámetros de configuración de la red NB-IoT planteada.....	40
Tabla 3. Parámetros de configuración de recursos de radio en NB-IoT.....	40
Tabla 4. Selección de parámetros NPRACH para tres escenarios según parámetros recomendados por el Release 13 de 3GPP.....	41
Tabla 5. Nivel de cobertura según el nivel de pérdida máxima de ruta.....	42
Tabla 6. Valor de repeticiones recomendadas dependiendo el nivel de cobertura.....	42
Tabla 7. Parámetros configurables que intervienen en el mecanismo de restricción de acceso y mecanismo de retroceso.....	49
Tabla 8. Resultados relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio con y sin el mecanismo de control en un solo nivel de cobertura con 3 retransmisiones	60
Tabla 9. Resultados relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio con y sin el mecanismo de control en un solo nivel de cobertura con 5 retransmisiones	61
Tabla 10. Resultados relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio con y sin el mecanismo de control en un solo nivel de cobertura con 5 retransmisiones	61
Tabla 11. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio dependiendo de la distribución de subportadoras en los niveles de cobertura mejorada y selección de configuración óptima. ..	80
Tabla 12. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio dependiendo del número de repeticiones por cada nivel de cobertura mejorada y selección de configuración óptima.	80
Tabla 13. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio dependiendo del número de retransmisiones en cada nivel de cobertura mejorada y selección de configuración óptima.	81
Tabla 14. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio dependiendo del factor de restricción de acceso para cada nivel de cobertura y selección de configuración óptima.	81
Tabla 15. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio dependiendo del tiempo de back-off para cada nivel de cobertura y selección de configuración óptima.....	82

RESUMEN

La internet de las cosas de banda estrecha (NB-IoT) cada vez es más necesaria para la automatización de ciudades inteligentes, puesto que aumenta la conectividad de dispositivos tipo máquina. NB-IoT surge como una propuesta para redes de área amplia con baja potencia para dispositivos en zonas con difícil cobertura y envían pequeñas cantidades de datos. La llegada de estos dispositivos a gran escala provoca una sobrecarga en la red, que finalmente conlleva a una serie de colisiones infinitas en el procedimiento de acceso aleatorio (RAP). En redes celulares se emplean mecanismos y técnicas que permiten realizar un control de acceso para evitar sobrecargar la red. Basados en este argumento, en esta tesis se diseña un mecanismo de control de congestión para comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC) de internet de las cosas. Este diseño se realiza mediante el trabajo en conjunto de dos mecanismos de control de congestión, el mecanismo de restricción de acceso (ACB) y el mecanismo de retroceso (Back-off). Para esto es necesario analizar información y parámetros que intervienen en el control de acceso de dispositivos como: número de repeticiones y número de retransmisiones dentro del procedimiento de acceso aleatorio. Además, mediante Matlab, se realiza la simulación del mecanismo de control propuesto y se analiza el mecanismo bajo diferentes cargas de tráfico y la modificación de parámetros que intervienen para evaluar el comportamiento y rendimiento de la red.

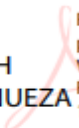
Palabras clave: IoT de banda estrecha, comunicaciones masivas de tipo máquina, algoritmo de back-off, mecanismo de restricción de acceso por clase, procedimiento de acceso aleatorio.

ABSTRACT

NarrowBand Internet of Things (NB-IoT) is becoming increasingly necessary for smart city automation, increasing the connectivity of machine-type devices. NB-IoT emerges as a proposal for wide area networks with low power for devices in areas with difficult coverage and sending small amounts of data. The arrival of these devices on a large scale causes an overload in the network, which eventually leads to a series of infinite collisions in the Random-Access Procedure (RAP). In cellular networks, mechanisms and techniques are used to perform access control to avoid overloading the network. Based on this argument, this thesis designs a congestion control mechanism for massive Machine Type Communications (mMTC) for the Internet of Things. This design is done by working together with two congestion control mechanisms, the Access Class Barring (ACB) mechanism, and the Back-off mechanism. For this, it is necessary to analyze information and parameters involved in devices' access control, such as the number of repetitions and number of retransmissions within the random-access procedure. In addition, using Matlab, the simulation of the proposed control mechanism is performed, and the mechanism is analyzed under different traffic loads and the modification of parameters involved to evaluate the behavior and performance of the network.

Keywords: Narrowband IoT, massive machine-type communications, back-off algorithm, access class barring mechanism, random access procedure.

DORIS
ELIZABETH
VALLE VINUEZA



Firmado digitalmente
por DORIS ELIZABETH
VALLE VINUEZA
Fecha: 2022.02.03
16:02:33 -05'00'

Reviewed by: Mgs. Doris Valle V.

ENGLISH PROFESSOR

c.c 0602019697

INTRODUCCIÓN

Los avances en tecnologías de la información y comunicación (TIC) han dado paso a un gran número de nuevos servicios de transmisión y recepción de información. Uno de los servicios que cada vez se vuelve más necesario en este ámbito es el Internet de las cosas o (*Internet of Things*, IoT).

IoT hace referencia a la interconexión de dispositivos inteligentes que se conectan de forma remota inicialmente a través de redes inalámbricas [1], con el paso del tiempo se empezó a investigar la prestación de este servicio a través de redes celulares [2], teniendo en cuenta especificaciones necesarias para su despliegue como: conexiones masivas, escalabilidad, seguridad entre otras. Con esta problemática el Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3rd Generation Partnership Project, 3GPP), organismo que estandariza las comunicaciones celulares a nivel mundial, publicó en 2016 la versión 13 del estándar LTE, el cual contiene las especificaciones de la tecnología llamada NarrowBand Internet of Things.

Internet de las cosas de banda estrecha (Narrow Band Internet of Things, NB-IoT), es una tecnología de red de área amplia de baja potencia conocida como (Low Power Wide-Area Network, LPWAN), que “permite la interconexión de dispositivos de IoT y que necesitan pequeñas cantidades de datos en periodos de tiempos largos” [3]. Además, contiene características como: bajo costo, bajo consumo de energía, baja latencia, alta disponibilidad, cobertura más amplia y profunda, también, es capaz de coexistir dentro de las redes desplegadas actualmente como GSM, UMT y LTE [4].

Uno de los temas claves dentro del futuro de IoT es el término *massive IoT* o Internet de las cosas masivo con necesidades como dispositivos de bajo costo [5], bajo consumo de energía, alta

densidad y cobertura profunda, en consecuencia, NB-IoT surge como una solución al desafío de *massive* IoT, y en un futuro se espera la coexistencia en redes móviles de quinta generación (5G) [6].

La comunicación de tipo máquina o (*Machine Type Communication*, MTC), es una terminología definida por 3GPP [7]. El término MTC se usa con frecuencia como terminología cuando un dispositivo de tipo máquina está conectado a través de una red celular [8]. MTC también representa exclusivamente el servicio de conectividad de máquinas inteligentes a través de la red celular y los dispositivos a los que brinda servicio NB-IoT, dentro de este término también se encuentra el MTC masivo que hace referencia a la comunicación de tipo máquina masivo.

Cada año se incrementa el número de dispositivos IoT, según el reporte de [9] 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, y según Cisco se espera alcanzar cerca de los 3.9 billones de dispositivos IoT conectados para el 2022 [10].

En la actualidad, los dispositivos MTC se están apropiando del mercado IoT [10] y al existir tantos dispositivos tipo máquina será necesario una tecnología que soporte comunicaciones masivas de tipo máquina, es decir la conexión de miles de dispositivos interactuando en una red compartida entre ellos. Para esto es necesario un mecanismo de control de congestión que permita evitar el problema de fallos en la red producto de las masivas peticiones de interconexión de los dispositivos.

En NB-IoT al igual que en LTE-A y LTE existe el procedimiento de acceso aleatorio (RAP), el cual se encarga de establecer el acceso inicial de los equipos de usuario (UE) al nodo B evolucionado (eNB) [11].

Dado los requerimientos de tráfico de *mMTC*, las peticiones sincronizadas al eNB podrían causar una congestión severa en la señalización del procedimiento de acceso aleatorio, lo que afectaría la calidad del servicio (QoS) y el rendimiento de la red.

En el presente proyecto de investigación se pretende analizar y diseñar un mecanismo de control de congestión en redes NB-IoT para comunicaciones masivas de tipo máquina que ayude a solucionar el problema de congestión de peticiones de conexión a las redes IoT. El primer paso será analizar y evaluar el procedimiento de acceso aleatorio, después se procederá a diseñar un mecanismo de control de acceso para observar su comportamiento bajo condiciones de tráfico *mMTC*, para finalizar se evaluará el rendimiento de la red con este mecanismo de control.

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Los operadores celulares en los últimos dos años tuvieron un incremento de 66% de dispositivos IoT conectados, y en la actualidad el 43% de dispositivos conectados son de tipo MTC destinados a distintas aplicaciones de IoT.

En redes celulares, el canal de transmisión es la interfaz de radio, el cual es un medio compartido y a pesar de que el tráfico generado por dispositivos MTC es insignificante, en el momento que varios dispositivos pretenden acceder a los recursos de la red de forma sincronizada, emplean un procedimiento de acceso aleatorio. Este procedimiento se encarga del establecimiento de comunicación (handshake), en el que los equipos de usuario NB-IoT (UE NB-IoT) envían una petición de uso del medio; si varios UE NB-IoT realizan esta petición al mismo tiempo pueden existir colisiones, creando problemas de sobrecarga a la red, lo cual afecta de forma significativa, reduciendo el rendimiento del sistema. Para mitigar esta problemática actual, se pretende analizar y diseñar un mecanismo de control de congestión en la tecnología NB-IoT para despliegues de comunicaciones masivas de internet de las cosas.

NB-IoT es una tecnología derivada de la red celular LTE la cual es capaz de coexistir dentro de las redes desplegadas actualmente, esta tecnología se encuentra estandarizada por el 3GPP y las especificaciones en la versión 13, fue creada con el objetivo de optimizar el tráfico de comunicaciones masivas de tipo máquina brindando un bajo consumo de energía y una cobertura más profunda.

El análisis y diseño del mecanismo de control de congestión permitirá conocer las principales variables que intervienen en el acceso al medio. Además, brindará conexiones masivas de dispositivos IoT evitando colisiones y sobrecargas en la red, lo que implicaría mejorar el rendimiento del sistema.

El método analítico y experimental serán la base de esta investigación. El análisis de parámetros e información y el modelamiento del procedimiento de acceso aleatorio permitirá determinar las debilidades en el procedimiento de acceso de los UE NB-IoT. Esta será la base para diseñar un mecanismo de control de congestión. Mediante herramientas de cálculo numérico como MATLAB, se realizará una simulación del mecanismo de control de congestión diseñado para redes NB-IoT y se evaluará su capacidad para soportar comunicaciones masivas de tipo máquina mediante pruebas con tráfico mMTC. Finalmente, el análisis de métricas clave de rendimiento como la probabilidad de acceso satisfactorio, el retardo en el acceso y la energía consumida en términos de número medio de transmisiones de preámbulo permitirá evaluar el efecto que tiene el mecanismo en el rendimiento de la red.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general.

- Diseñar un mecanismo de control de congestión en la tecnología NB-IoT para despliegues de comunicaciones masivas de Internet de las Cosas.

1.2.2. Objetivos específicos.

- Analizar parámetros e información del control de acceso al medio en la tecnología NB-IoT.
- Simular un mecanismo de control de congestión en redes NB-IoT para despliegues de comunicación masiva de Internet de las Cosas.
- Evaluar el mecanismo de control de congestión bajo diferentes cargas de tráfico en redes NB-IoT.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

1.3. ESTADO DEL ARTE

La siguiente sección ofrece diferentes definiciones de lo que es IoT [12] además de información recopilada de diferentes organizaciones de estandarización, misma que permitirá reflejar diferentes perspectivas, respaldando distintos intereses comerciales.

Según el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) en su reporte especial sobre internet de las cosas [13] describió a IoT como “Una red de elementos, cada uno integrado con sensores, que están conectados a Internet”, aunque esta declaración no sea una definición clara y concisa si proporciona una buena descripción de la parte física que compone la IoT.

El uso de Internet de las cosas a través de redes móviles se denomina Celular IoT (CIoT) y en los últimos años ha obtenido una importancia significativa en la industria, educación y los organismos de estandarización que se encargan de la tecnología relacionada al internet de las cosas [14], pero no cualquier red celular es capaz de soportar los requisitos necesarios que permitan a los dispositivos móviles conectarse a redes de IoT, a causa de esta problemática se generaron estándares para este tipo de redes que permiten a los usuarios tener respuestas positivas a problemas comunes como el acceso a la red de comunicación IoT.

Las redes celulares se han ajustado al uso del internet de las cosas dando origen a redes como NB-IoT, en [15] se describe el historial de desarrollo y estandarización de NB-IoT, sus características principales y además proporciona una visión general que permite comprender los principales problemas de esta tecnología.

NB-IoT es una de las tecnologías Celular IoT (CIoT) definido bajo 3GPP [14], para su estandarización existieron varios desafíos, uno de los más importantes y que se sigue estudiando en la actualidad son las mMTC según [5]. En [16] se encuentran los requerimientos necesarios para MTC.

En NB-IoT, así como en otras tecnologías, el control de acceso al medio es realizado por un procedimiento de capa 2 conocido como RAP, este control de acceso es similar en LTE y LTE-A con ciertas diferencias [11] [17] [18] [19].

En [20] se realiza una mejora eficiente en el canal de acceso aleatorio de LTE-A con tráfico masivo de tipo máquina, demostrando mediante simulaciones el número de preámbulos exitosos y colisionados obtenidos en un intervalo de tiempo.

Por otro lado en [21] presentan una evaluación al procedimiento de acceso aleatorio de Narrow Band IoT, mediante una simulación de código abierto del RAP en la cual se implementa un modelo analítico el cual se enfoca en la probabilidad de acceso satisfactorio y colisiones obtenidas a partir de los intentos de acceso de los dispositivos IoT, aquí queda demostrado que la comunicación masiva MTC conduce a una mayor probabilidad de colisión de preámbulos de acceso aleatorio (RA) el cual sirve como de inicio de nuestra investigación.

Otro artículo a tomar en cuenta en nuestra investigación es el análisis realizado por [22] en el cual describe los parámetros utilizados en el procedimiento de acceso aleatorio de NB-IoT directamente con la probabilidad de acceso satisfactorio, además de calcular el retardo promedio en diferentes escenarios de comunicación.

En la **Figura 1** se puede observar el procedimiento de acceso aleatorio entre un dispositivo IoT y una estación base.

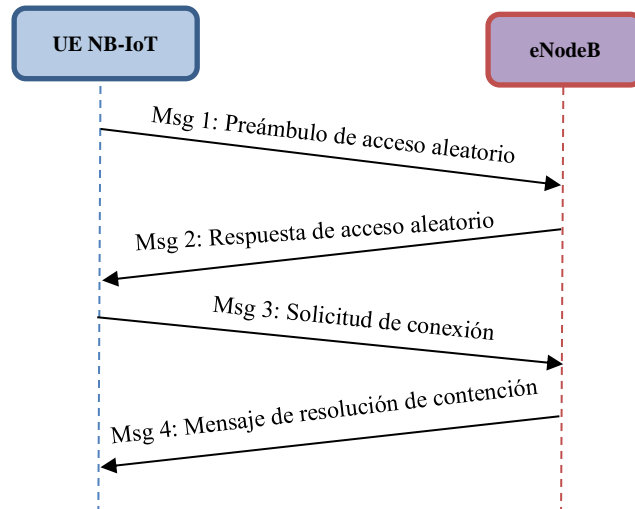


Figura 1. Procedimiento de acceso aleatorio que se produce entre un dispositivo y un nodo NB IoT

Fuente: Autor

En [23] realizan la optimización del canal de acceso aleatorio permitiendo una mayor probabilidad de acceso satisfactorio, que podría ser mejorable mediante el mecanismo planteado en esa misma investigación, considerando los beneficios que ofrecería el mecanismo de control, puede ser el inicio de nuevas investigaciones de optimización del RAP.

1.4. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.4.1. NarrowBand - Internet of Things

Internet de las cosas de banda estrecha fue publicada en Julio del 2016 por el 3rd Generation Partnership Project (3GPP), con sus especificaciones en la versión 13. Es una tecnología de red de área amplia de baja potencia (LPWAN), que tiene como objetivo brindar la conexión para

aplicaciones de IoT masivas de baja velocidad de datos, ofreciendo ciertas características que no puede igualar otras tecnologías relacionadas.

A continuación, se presenta una descripción de las características clave de NB-IoT:

1. Uso de ancho de banda estrecho

El ancho de banda que ocupa NB-IoT es apenas de 180 kHz tanto para el enlace de subida, como el enlace de bajada [21], lo cual es aceptable para aplicaciones de baja velocidad de datos, al mismo tiempo que mantiene un bajo consumo de energía, permitiendo una alta durabilidad de la batería de los dispositivos.

2. Mayor cobertura en interiores y exteriores

Un bloque de transporte puede transmitirse varias veces para mejorar la intensidad de la señal en el receptor (UE o eNB), lo que aumenta la probabilidad de decodificación exitosa. Esto ayuda a mejorar la cobertura en áreas de baja intensidad de señal recibida.

3. Espaciado de subportadora reducido.

El enlace ascendente y descendente tiene un espaciado convencional de LTE de 15 kHz, además, el enlace ascendente cuenta con un espaciado de subportadora de 3.75 kHz, que permite mejorar aún más la señal de cobertura.

4. Uso de espectro con licencia

Esta tecnología permite el uso del espectro con licencia, operando sobre redes GSM y LTE, en la **Figura 2** podemos ver los tres modos de operación posible definidos como:

- **Stand-Alone:** utiliza una portadora GSM de 200 kHz, dejando un intervalo de guarda de 10 kHz a ambos lados **Figura 2a**.
- **In-Band:** utiliza una portadora LTE para implementar una o más portadoras NB-IoT **Figura 2b**.
- **Guard-Band:** utiliza la banda de guardia de LTE para implementar una o más portadoras NB-IoT **Figura 2c**.

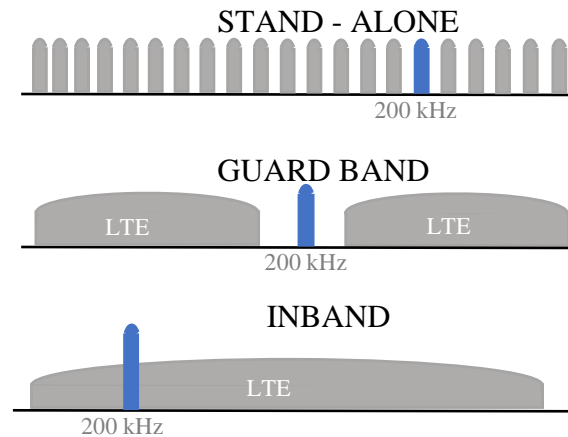


Figura 2. Modos de operación posibles en LTE. **2a)** Modo estándar. **2b)** Modo banda de guardia de LTE. **2c)** Modo en banda uso del espectro LTE.

Fuente: Autor

En cualquier modo de operación, los canales NB-IoT son transparentes para otros dispositivos, es decir, los dispositivos LTE que no tienen la funcionalidad de NB-IoT no pueden ver este canal, de igual manera, los dispositivos GSM no podrán ver la portadora y en consecuencia solo verán ruido cuando el dispositivo este activo [21].

1.4.2. Cobertura Mejorada Nb-IoT

La función de cobertura mejorada (Coverage Enhanced, CE) se logra mediante la transmisión repetida de datos y la señalización de control de acceso al medio; esta es especialmente útil cuando los sensores están ubicados en áreas remotas o de difícil acceso.

Las transmisiones en cada nivel de cobertura se pueden configurar para que se repita un número determinado de veces con el fin de lograr mayores oportunidades de éxito en el nivel de cobertura deseado de modo que cuando la pérdida de ruta en la cobertura deseada es alta se puede configurar un mayor número de repeticiones. La red puede configurar hasta tres niveles de mejora de cobertura (CE-0, CE-1, CE-2) para dar servicio a equipos de usuario con diferentes pérdidas de ruta como se muestra en la **Figura 3**.

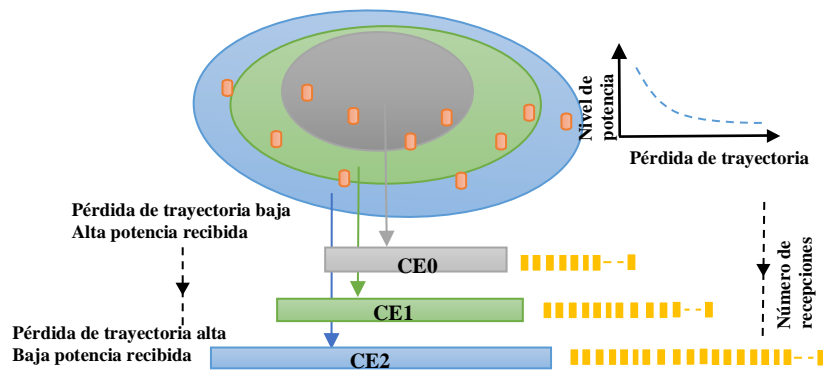


Figura 3. Niveles de mejora de cobertura y número de repeticiones por la pérdida de trayectoria
Fuente: Autor

El principal impacto de los diferentes niveles de CE es que el mensaje debe repetirse un número diferente de veces. Si el dispositivo reside en el nivel CE con menor pérdida de ruta (CE-0), entonces el número de veces que la señal debe repetirse es menor. Sin embargo, el número de repeticiones configuradas es mayor para el dispositivo en el nivel CE que manifiesta una alta

pérdida de ruta (CE-2). Esto asegura que se reciba una buena calidad de señal en todos los niveles CE configurados.

1.4.3. Comunicaciones masivas de tipo máquina

Massive Machine Type Communications (mMTC), hace referencia a la conexión de dispositivos tipo máquina utilizados en aplicaciones para Internet de las cosas a una escala masiva (miles de conexiones). Este tipo de comunicación es el último avance en comunicación industrial y proporciona una variedad de temas de investigación relacionados con la industria, el medio ambiente y la internet de las cosas.

mMTC proporciona una plataforma para la instrumentación, equipos de procesamiento y sensores para comunicarse a través de canales cableados o inalámbricos. Su objetivo es mejorar la productividad y la eficiencia industrial, aumentando así la producción de la fábrica y la oportunidad abierta para nuevos modelos de negocio.

Las mMTC en el contexto de la industria 4.0 ayudará a automatizar completamente los sistemas de control, extraer metadatos, procesarlos y cargarlos en la nube. Del mismo modo, en el contexto de las ciudades inteligentes, cada dispositivo de medición, equipo de seguridad y vigilancia y los sensores de monitoreo se comunicarán con la nube sin la intervención humana utilizando tecnologías LPWAN.

La función principal de mMTC es recopilar y procesar una gran cantidad de pequeños paquetes de datos en un intervalo determinado, comprometido con la velocidad de datos disponible y la latencia.

Como se muestra en la **Figura 4**, Cisco pronostica que la cantidad de dispositivos conectados a una red móvil masiva será cerca del doble para 2023, mientras que el volumen de tráfico se cuadruplicará durante el mismo tiempo.

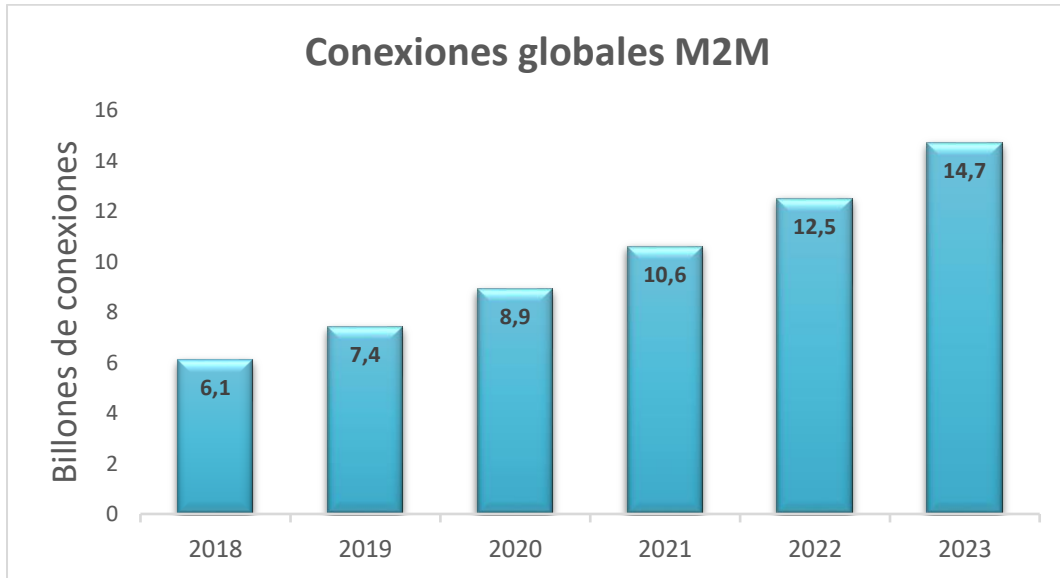


Figura 4. Pronóstico de cantidad de dispositivos M2M conectados a una red móvil masiva para 2023

Fuente: [24]

1.4.4. NB-IoT en comunicaciones masivas de tipo máquina

NB-IoT es una de las tecnologías candidatas a brindar el servicio de interconexión para comunicaciones masivas de tipo máquina debido a las grandes características que ofrece, superando varios desafíos clave en aplicaciones de gran volumen y comunicaciones de tipo máquina con transmisión de datos baja durante periodos de tiempo largos. Por esta razón, esta tecnología celular ha sido reconocida como una red prometedora y efectiva que ofrece conectividad inalámbrica a dispositivos masivos de IoT. A continuación, se enumera los principales desafíos:

1. **Costo de infraestructura:** Un desafío clave que se supera gracias a la habilidad de coexistir en redes que ya se encuentran desplegadas como GSM, LTE y 5G.
2. **Duración de la batería:** El dispositivo puede mantenerse en modo de suspensión durante minutos, horas, incluso días y ponerse en contacto con la red según las necesidades, lo que permite una mayor conservación de la batería.
3. **Cobertura:** La conectividad profunda en interiores es uno de los desafíos más grandes para las distintas aplicaciones en la industria, pero con NB-IoT, esto no supone ningún problema al utilizar distintos niveles de cobertura con distintas configuraciones para beneficiar a dispositivos con baja cobertura.
4. **Escalabilidad:** Al utilizar infraestructura LTE o 5G se consigue una red con la capacidad de escalar fácilmente para manejar miles o millones de dispositivos.

1.4.5. NPRACH

NarrowBand Physical Random Access Channel o en español canal de acceso aleatorio físico de banda estrecha es uno de los canales críticos y primarios en la fase inicial de la transmisión. Antes de que el dispositivo final obtenga recursos de tiempo y frecuencia para la transmisión, primero escucha la información transmitida desde la estación base. Los recursos NPRACH se asignan por cada nivel de cobertura mejorada.

NPRACH usa una configuración de tono único y un espaciado de subportadoras de 3,75 kHz, por lo que ocupa entre 45 y 180 kHz, según el número de subportadoras. El preámbulo de acceso aleatorio NB-IoT se muestra en la **Figura 5** y se caracteriza principalmente por cuatro grupos de símbolos, cada uno de los cuales comprende cinco símbolos OFDM más el prefijo cíclico.

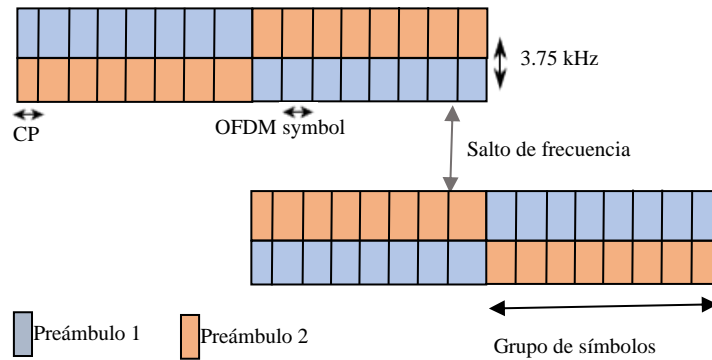


Figura 5. Preámbulos NPRACH
Fuente: Autor

Un solo preámbulo NPRACH dura 5.6 ms o 6.4 ms, un algoritmo de salto de frecuencia pseudoaleatorio ofrece como preámbulos diferentes el número de subportadoras asignadas al NPRACH. En consecuencia, la selección de diferentes subportadoras al comienzo de la transmisión asegura esquemas de salto que nunca se superponen.

Cada uno se describe mediante la periodicidad, el número de repeticiones, la hora de inicio, la ubicación de la frecuencia y el número de subportadoras (s), como se muestra en la **Figura 6**. Generalmente, un recurso NPRACH se denomina Oportunidad de acceso aleatorio (RAO).

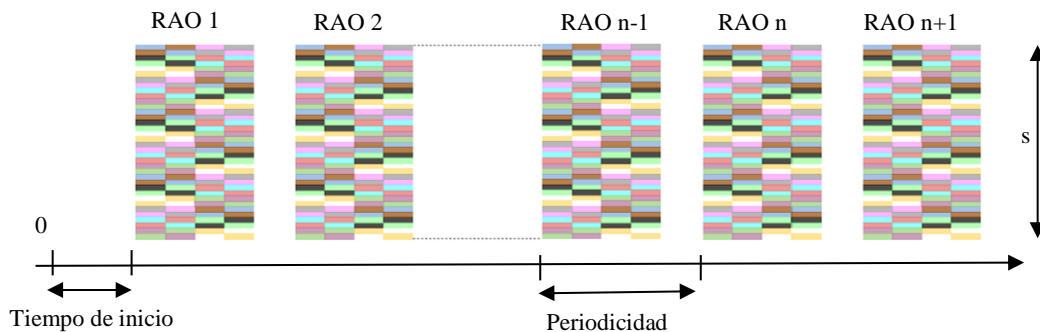


Figura 6. Oportunidad de acceso aleatorio
Fuente: Autor

El dispositivo final determina el tiempo y la frecuencia iniciales para la transmisión del enlace ascendente y las repeticiones se calcularán en función del algoritmo de control de acceso aleatorio. En contraste con el LTE heredado, el preámbulo se repetirá para una operación robusta en NB-IoT.

1.4.6. Procedimiento de acceso aleatorio

El procedimiento de acceso aleatorio es la relación principal establecida entre los dispositivos y la estación base. Este está constituido sobre un mecanismo basado en contención que produce una degradación del rendimiento cuando tiene lugar una multitud de transmisiones simultáneas. Comienza con la estación base que transmite las señales de sincronización a los UE, posteriormente el UE sincroniza el tiempo y la frecuencia con la estación base, luego se detecta la estructura de trama y la identidad física de la celda. Después de la sincronización, el UE escucha el canal de difusión para obtener información del enlace ascendente. Al recuperar el bloque de información de administración (*Master Information Block*, MIB), el UE conoce el estado de restricción de acceso, el modo de operación y la información de programación del sistema.

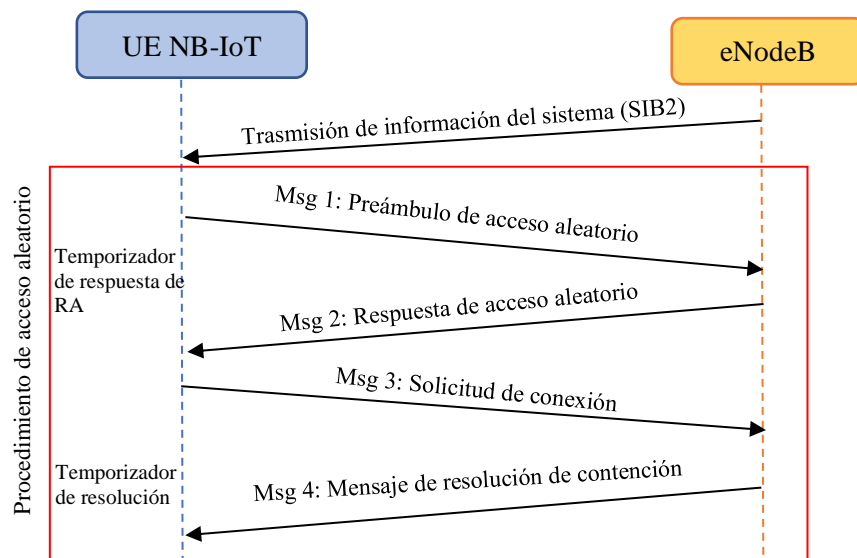


Figura 7. Variables que intervienen en el procedimiento de acceso aleatorio

Fuente: Autor

El Bloque de Información de Sistema (*System Information Block*, SIB), contiene información relevante para el UE, específicamente el SIB tipo 2 (SIB-2), el contiene la configuración de recursos de radio, avance de tiempo, configuración de NPRACH y la información de programación de enlace ascendente / enlace descendente.

La información de control de enlace descendente (DCI) lleva la asignación de recursos para el procedimiento de acceso aleatorio y el retraso de programación. Al leer la asignación de recursos del enlace ascendente, para el procedimiento de acceso aleatorio, el UE ajusta la temporización del enlace ascendente según la información del indicador de control del enlace descendente, para finalmente transmitir el preámbulo sobre la frecuencia elegida aleatoriamente.

El procedimiento de acceso aleatorio se basa en la transmisión de cuatro mensajes como muestra la **Figura 7**, detallados a continuación.

- **Asignación de preámbulo de acceso aleatorio:** la estación base transmite información de preámbulo de acceso aleatorio (RA). El UE transmite el preámbulo durante el recurso de acceso aleatorio proporcionado en este proceso podría haber una colisión con otros UE que se puede detectar en la estación base.
- **Asignación de respuesta de acceso aleatorio (RAR):** el UE luego escucha la ventana RAR para obtener información de recursos de tiempo / frecuencia. Según la información, el UE ajusta su tiempo de enlace ascendente y se prepara para la solicitud de recursos de radio.
- **Solicitud de recursos de radio:** el UE inicia una solicitud de control de recursos de radio (RRC) a la estación base para cumplir con el número de bytes de información que desea enviar.
- **Resolución de contención:** la estación base en esta etapa decodifica la solicitud y revierte un identificador que está asignado de forma exclusiva para el UE en este proceso solo el usuario correcto puede decodificarlo y tener éxito con el procedimiento RACH.

1.4.7. Mecanismos de Control de Congestión

El control de la congestión es un tema ampliamente investigado en el cual se han desarrollado e implementado muchos protocolos y algoritmos en el mundo real que ayudan a solucionar uno de los principales problemas que se tiene en las redes de comunicación. En diferentes tipos de red, diversas versiones de TCP como Reno, Tahoe, Vegas y New Reno se consideran protocolos de control de congestión tradicionales y heredados. Los protocolos TCP cúbicos y compuestos se utilizaron como mecanismo de control de congestión durante muchos años en diferentes tipos de

redes. El mecanismo de congestión de TCP compuesto emplea dos ventanas para solucionar el problema de conexión a la red.

Esos protocolos tradicionales y heredados nunca cumplieron con los requisitos de las redes celulares ya que la capacidad del canal cambia abruptamente y nunca funcionan con capacidad fija. Además, estos mecanismos de control de la congestión nunca pueden evaluar la pérdida probable debido a la congestión. Para esto, TCP puede funcionar y trabajar en nuevas redes en desarrollo, como las redes celulares, si se utiliza el enfoque de emplear la retroalimentación del enrutador de manera que logre solucionar los problemas relacionados con las masivas peticiones de conexión.

TCP ha gobernado el mundo del control de congestión durante muchos años, pero en la actualidad se han desarrollado nuevos protocolos para nuevas redes. En LTE-A el 3GPP adopta el Mecanismo de Restricción de Acceso (Access Class Barring, ACB) y el Mecanismo de Retroceso o Back-off como mecanismos de control de sobrecarga de red para prevenir fallas de acceso.

1.4.7.1. Access Class Barring

En una red celular con NB-IoT, si miles de dispositivos intentan obtener acceso a una misma celda al mismo tiempo, lo más probable es que solo uno logre acceder por cada oportunidad, es por eso que el desafío de conexiones masivas se sigue estudiando hasta la actualidad. Uno de los métodos de control de congestión más populares en las redes celulares es el ACB, el cual es un esquema de control de congestión diseñado para limitar el número de intentos de acceso simultáneo desde ciertos dispositivos UE [25] [26].

El eNB difunde a las diferentes clases de tráfico un conjunto de parámetros relacionados con ACB, como parte de información del sistema, un factor de tasa de restricción y un temporizador de restricción que permiten a los dispositivos UE tener un control de acceso a la estación base. En este procedimiento cada dispositivo realiza un ensayo de Bernoulli para determinar si está prohibido o no, basándose en el valor de tasa de restricción.

El objetivo principal de ACB es distribuir las solicitudes de acceso de los UE a través del tiempo para reducir el número de solicitudes de acceso por RAO de modo que ayude a evitar las solicitudes de acceso masivo al RACH.

1.4.7.2. Back-off

El mecanismo de back-off es uno de los mecanismos de control ampliamente utilizado, el cual describe un algoritmo usado para dividir en el tiempo las retransmisiones repetidas de un mismo bloque de datos, generalmente se utiliza para descongestión en la red. Este mecanismo es utilizado generalmente en Ethernet para programar retransmisiones después de colisiones.

Si se produce una colisión entre 2 dispositivos A y B y se retransmite tan pronto como puedan después de la colisión, esto siempre provocará otra colisión y formará un bucle infinito de colisiones. Para evitar tal escenario, se utiliza dicho mecanismo de back-off.

Si el mecanismo actuara en el mismo ejemplo, después de la colisión entre ambos dispositivos, se produciría un tiempo aleatorio de retraso para el envío de paquetes, tanto para el dispositivo A, como para el dispositivo B, permitiendo así a solo uno de ellos acceder al medio y enviar información; en caso de que volviese a existir colisión el mecanismo volvería a actuar.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. Investigación exploratoria

Este tipo de investigación permite analizar aspectos que aún no han sido analizados a profundidad. Se necesita el análisis y la revisión de información de modo que se demuestre las vulnerabilidades del control de congestión de NB-IoT en despliegues masivos de internet de las cosas, también es necesario analizar métricas de rendimiento y eventos no planificados para realizar una evaluación.

Además, para el diseño del mecanismo de control de congestión es necesario estudiar modelos adecuados o métodos de aproximación que permitan mejorar la congestión de despliegues masivos de IoT.

3.1.2. Investigación experimental

La investigación experimental permite obtener datos necesarios del tema y plantear posibles soluciones. Se enfoca en un conjunto de variables experimentales que se miden como sujeto del experimento, donde el investigador puede manipular estas variables a conveniencia y observar si los resultados del experimento son favorables para el tema en cuestión. Con este tipo de investigación podremos manipular variables de una red NB-IoT que nos permitan conocer el comportamiento de la red bajo ciertos parámetros establecidos por el investigador.

3.2. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

3.2.1. Método descriptivo

Se utilizará este método para describir el comportamiento de parámetros establecidos y obtener información precisa que permita dar solución a la investigación.

- Estudio de parámetros e información del control de acceso al medio en NB-IoT.
- Diseño de un mecanismo de control de congestión NB-IoT

3.2.2. Método experimental

- Simular el mecanismo de control de congestión NB-IoT

3.2.3. Método analítico

El método analítico mediante la observación permite el análisis y evaluación de un fenómeno en particular, mediante este método vamos a analizar y evaluar el comportamiento del mecanismo de control de congestión.

- Evaluación del mecanismo de control de congestión NB-IoT

3.3. TÉCNICAS

3.3.1. Observación

Para esta investigación se utiliza la observación como técnica de tipo estructurada que permite un estudio más preciso de los parámetros que vamos a evaluar y visualizar de forma ordenada.

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.4.1. Población

Según el modelo de tráfico mMTC sugerido por el 3GPP el número de dispositivos mMTC que intentan acceder a la red varía desde 1 a 10000 y están distribuidos en el tiempo de acuerdo a una distribución Beta de parámetros (3,4) para los tiempos de llegada. Esta población se somete al modelamiento del canal de acceso aleatorio bajo diferentes condiciones de tráfico para la recolección de datos.

3.4.2. Muestra

La muestra consiste en los dispositivos que han conseguido satisfactoriamente la conexión al medio. De aquí se obtiene información de los parámetros necesarios para evaluar el rendimiento en la red.

También se analizará la probabilidad de acceso satisfactorio, proceso de llegada y tiempo de acceso, generados por el modelamiento del método analítico empleado en la simulación del sistema.

3.5. FUENTES DE RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

En la presente investigación se realizó una recopilación de información científica existente sobre el tema de estudio y modelos similares a la tecnología NB-IoT para comunicación mMTC. También se realizó una revisión sistemática de literatura (libros, artículos científicos, reportes, estándares) en bases de datos como IEEE, scopus, reportes de empresas líderes en el sector del internet de las cosas y redes celulares como Cisco y Telefónica además de estándares

internacionales definidos por el 3GPP, considerando fechas de publicación de los últimos 5 años y escritos en idioma inglés y español y se considera la revisión total del artículo con el fin de extraer información relevante.

3.6. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS

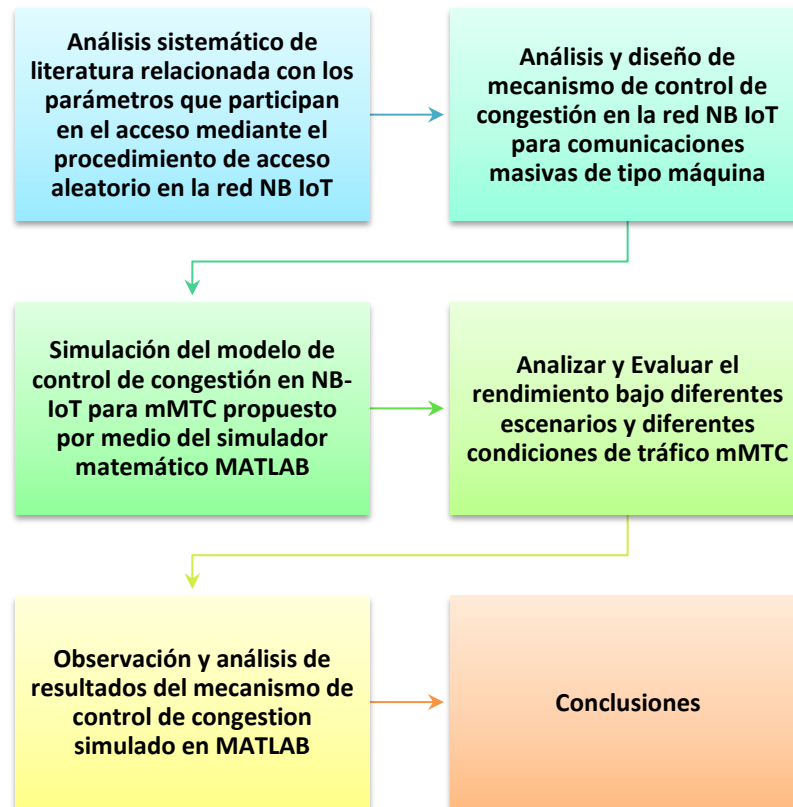


Figura 8. Procesamiento y análisis de la investigación

Fuente: Autor

3.7. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Variables dependientes

- Probabilidad de acceso satisfactorio
- Tiempo de acceso

VARIABLES INDEPENDIENTES

- Factor de restricción
- Tiempo de back-off.

Tabla 1. Operacionalización de las variables
Fuente: Autor

	Variable	Concepto	Indicadores	Instrumentos
VARIABLES DEPENDIENTES	Probabilidad de acceso satisfactorio	Esta variable indica la probabilidad de UEs NB-IoT completen con éxito el RAP.	Probabilidad de acceso satisfactorio entre 0 – 1.	<ul style="list-style-type: none"> ● Observación directa a través de un modelo de simulación del mecanismo de control de congestión (Matlab) ● Software de simulación MATLAB ● Comparación con el modelo de acceso.
	Tiempo de acceso	El tiempo transcurrido entre el primer intento de acceso (transmisión del preámbulo) y la conexión exitosa del RAP.	Retardo en el acceso medido en segundos.	
VARIABLES INDEPENDIENTES	Factor de restricción	Es una medida del mecanismo de restricción de acceso, la medida umbral para poder obtener el acceso al RAO.	Umbral de restricción de acceso, valor entre 0 – 1.	
	Tiempo de Back-off	Tiempo aleatorio (back-off) antes de volver a intentar una nueva transmisión.	Medido en segundos	

3.8. PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS

Como observamos en el capítulo anterior, para acceder a la red NB-IoT, los UEs realizan un intercambio de información con el eNB, a continuación, se detalla el procedimiento de acceso aleatorio.

1. Los UE NB-IoT reciben el SIB-2 el cual contiene los parámetros de configuración básica del RACH, además el nivel de cobertura de cada dispositivo depende de la señal de potencia recibida y la pérdida máxima de ruta.
2. El UE NB-IoT encuentra el primer RAO disponible y transmite el Random Access Preamble elegido entre los que se encuentran disponibles.
3. El eNB recibe el preámbulo e inmediatamente transmite un mensaje que indica al dispositivo que recurso de enlace ascendente se ha asignado para la transmisión del Random Access Response, en el caso que el UE NB-IoT no reciba el Random Access Response, el dispositivo seguirá esperando hasta que termine el temporizador de respuesta de RA.
4. Haciendo uso de los recursos asignados, el UE NB-IoT transmite su identidad y otra información importante a la estación base; esto es más conocido como MSG3 e inmediatamente inicia el Temporizador de Resolución de Contención (*Contention Resolution Timer, CRT*).
5. La estación base (eNB) realiza la resolución de contención y envía a los dispositivos la identidad de los recursos ganadores a través del temporizador de resolución de contención.

Nota: Si el UE NB-IoT no recibe el mensaje de resolución de contención, este continúa esperando hasta el vencimiento del temporizador.

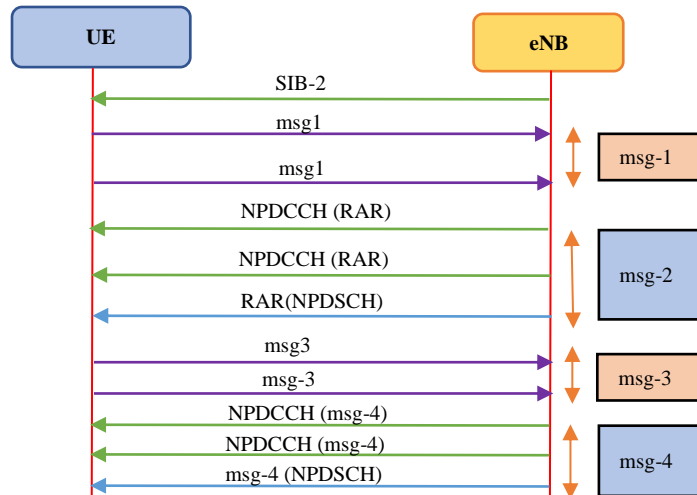


Figura 9. Mensajes del procedimiento aleatorio y canales utilizados para transmisión y recepción
Fuente: Autor

El procedimiento es realizado en una porción de espectro de 180 KHz, estructurada de la siguiente manera:

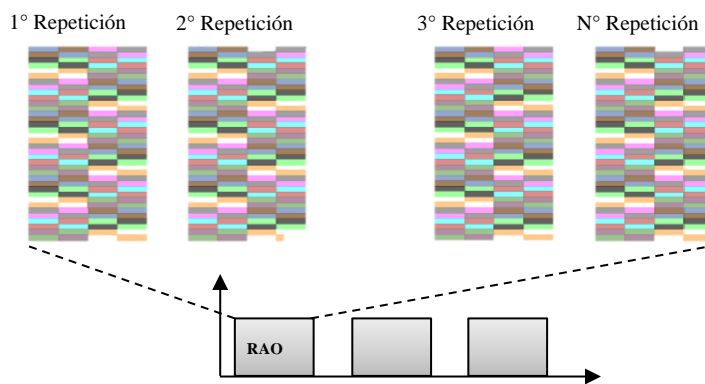


Figura 10. Estructura del preámbulo NB-IoT
Fuente: Autor

La **Figura 10** muestra la estructura del RAO NB-IoT, en el cual podemos observar que contiene un cierto número de subportadoras, cada subportadora puede transmitir un preámbulo NB IoT, el espectro es de 180 kHz y el espaciado puede ser de hasta 3.75 kHz permitiendo obtener un total de 48 subportadoras. En la **Tabla 2** se detalla los parámetros de red utilizados.

Tabla 2. *Parámetros de configuración de la red NB-IoT planteada*
Fuente: Autor

Entorno de Red	
Parámetro	Valor
Ancho de banda	180 kHz
Espaciado de subportadora	3.75 kHz (Máximo 48 subportadoras)
Modelo del canal	Canal de desvanecimiento de Rayleigh

3.8.1. Parámetros de Información del Sistema NB-IoT

Antes de iniciar el procedimiento de acceso aleatorio, necesitamos comprender los parámetros de capa superior de RACH, como en LTE el bloque de información de sistema (SIB) se usa para transmitir información que es válida para todos los UE NB-IoT dentro de una celda.

Específicamente en el RAP, el UE NB-IoT necesita la información del bloque de información de sistema de tipo 2 (SIB-2), el cual contiene información de configuración de recursos de radio que es común para todos los UE NB-IoT, a continuación, en la **Tabla 3**, se detalla esta información.

Tabla 3. *Parámetros de configuración de recursos de radio en NB-IoT*
Fuente: Autor

NPRACH-Parameters-NB-r13		
Parámetro	Valor	Descripción
Nprach-Periodicity-r13	{ms40, ms80, ms160, ms240, ms320, ms640, ms1280, ms2560}	Periodicidad de los recursos de la NPRACH
nprach-StartTime-r13	{ms8, ms16, ms32, ms64, ms128, ms256, ms512, ms1024}	Hora de inicio de NPRACH en una trama de radio donde se puede transmitir NPRACH.

nprach-NumSubcarriers-r13	{n12, n24, n36, n48}	Número de subportadoras en un recurso NPRACH
maxNumPreambleAttemptCE-r13	{n3, n4, n5, n6, n7, n8, n10, spare1}	Número máximo de intentos de transmisión de preámbulo por recurso NPRACH
numRepetitionsPerPreambleAttempt-r13	{n1, n2, n4, n8, n16, n32, n64, n128}	Número de repeticiones NPRACH por intento

Para encontrar los valores óptimos es necesario realizar un análisis y comparación entre varios escenarios, por este motivo, para la simulación se ha determinado tres escenarios detallados en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Selección de parámetros NPRACH para tres escenarios según parámetros recomendados por el Release 13 de 3GPP

Fuente: Autor

Parámetro NPRACH	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Nprach-Periodicity-r13	ms40	ms320	ms2560
nprach-StartTime-r13	ms8	ms64	ms1024
nprach-NumSubcarriers-r13	n48	n48	n48
maxNumPreambleAttemptCE-r13	n3	n6	n10
numRepetitionsPerPreambleAttempt-r13	n32	n64	n128

3.8.2. Factores de Configuración

3.8.2.1. Repeticiones

El mismo mensaje de un preámbulo puede repetirse varias veces dentro de un RAO, según las condiciones del canal experimentadas por el UE NB-IoT. Los niveles de cobertura se definen en función de la pérdida máxima de ruta (*Path Loss*, PL) experimentada, utilizando los siguientes umbrales detallados en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Nivel de cobertura según el nivel de pérdida máxima de ruta

Fuente: Autor

Nivel de cobertura	Valor
CE-0	$PL \leq 144 \text{ dB}$
CE-1	$144 \text{ dB} < PL \leq 155.7 \text{ dB}$
CE-2	$155.7 \text{ dB} < PL \leq 164 \text{ dB}$

El número de repeticiones por preámbulo puede variar entre $\{1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128\}$, siendo CE-0 el nivel de cobertura más bajo y CE-2 el más alto. En un nivel de CE específico, el tiempo necesario para la transmisión de un preámbulo, es decir la duración de un solo RAO, es igual al tiempo necesario para completar el número de repeticiones seleccionadas para el nivel específico.

$$t_b = Rep_b * 5.6ms \quad (1)$$

Donde:

Tabla 6. Valor de repeticiones recomendadas dependiendo el nivel de cobertura

Fuente: Autor

Nivel de cobertura	Número de repeticiones
CE-0	$Rep_0 \in \{1, 2, 4\}$
CE-1	$Rep_1 \in \{4, 8, 16, 32\}$
CE-2	$Rep_2 \in \{16, 32, 64, 128\}$

En la **Figura 11** se observa el método de selección del nivel de cobertura mejorada, un dispositivo puede cambiar su nivel de cobertura a uno superior, pero no puede regresar de nivel. Si el dispositivo cumple el número de repeticiones en ese nivel, pasa automáticamente al siguiente nivel

de cobertura siempre y cuando aún siga disponible el número de repeticiones globales, si el dispositivo se encuentra en el último nivel de cobertura se mantendrá en el mismo nivel, aunque termine el número de repeticiones permitidas en el nivel de cobertura hasta que se termine el número de repeticiones globales.

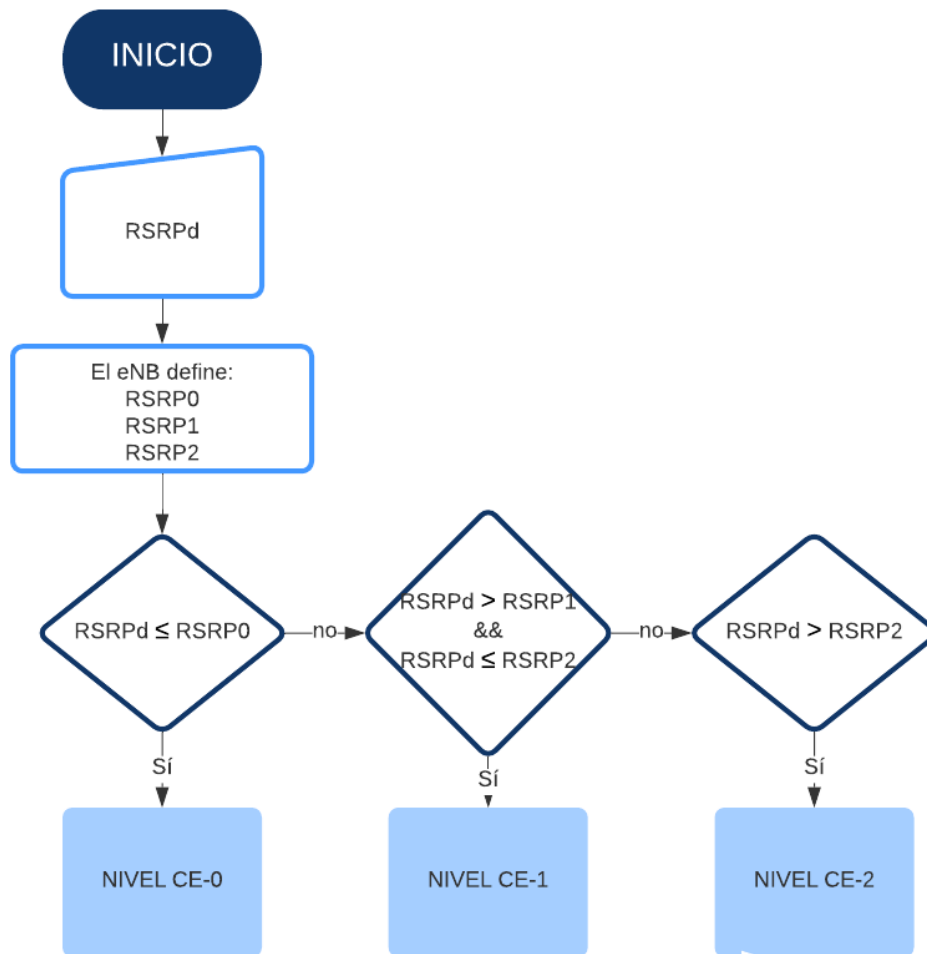


Figura 11. Selección del nivel de cobertura dependiendo de la señal de potencia recibida
Fuente: Autor

3.8.2.2. Access Class Barring

Prohibición de clase de acceso es uno de los mecanismos propuestos para disminuir la sobrecarga de la red, este mecanismo puede posponer la transmisión del preámbulo de un dispositivo por un periodo de tiempo. Esto significa, que cuando un dispositivo está listo para transmitir un

preámbulo, puede continuar inmediatamente con la transmisión solo si el modo de restricción de acceso esta desactivado.

En la práctica, en el caso de que la estación base detecte que el número de recepciones de preámbulo recientes es superior a un umbral, solicita a todos los dispositivos que cambien al modo de restricción de acceso. En este modo, cada dispositivo genera un valor aleatorio entre 0 y 1, y solo si el valor generado es menor que un factor de restricción ρ_{ACB} , se realiza la transmisión. De lo contrario, el dispositivo está excluido del procedimiento RA durante un tiempo t_{ACB} que se calcula mediante la **ecuación 2** y un tiempo generado aleatoriamente.

$$t_{ACB} = (0.7 + 0.6 \times rand) \times \rho_{ACB} \quad (2)$$

Cada dispositivo genera un nuevo valor aleatorio en el siguiente RAO disponible, y esto continúa hasta que el valor generado es menor que ρ_{ACB} . De esta manera, se puede controlar el número de dispositivo presentes en un RAO. Finalmente, para aplicar el método ACB la estación base transmite el factor de restricción ρ_{ACB} y el tiempo de restricción t_{ACB} a los UE.

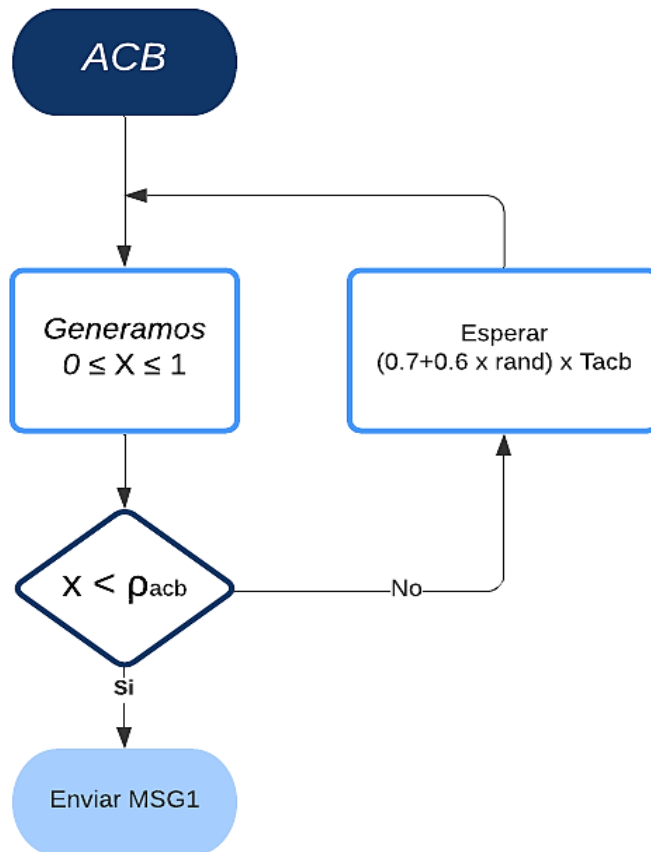


Figura 12. Diagrama de flujo del mecanismo de restricción de acceso por clase ACB
Fuente: Autor

3.8.2.3. Ventana de Retroceso (Back-off)

El mecanismo ACB proporciona un control bajo demanda de la contención del sistema, también se aplica un mecanismo de retroceso convencional antes de cualquier transmisión. Tras la falla del RA, el dispositivo retrasa su próximo intento de RA durante un tiempo máximo dado por el tamaño de la ventana de retroceso.

El tamaño de la ventana de retroceso, denotado por BW , lo transmite la estación base y se puede ajustar de acuerdo con la densidad del dispositivo en cada RAO. De esta manera, el número de dispositivos en competencia se distribuye a lo largo del tiempo y, por lo tanto, se reduce la congestión en el RAO.

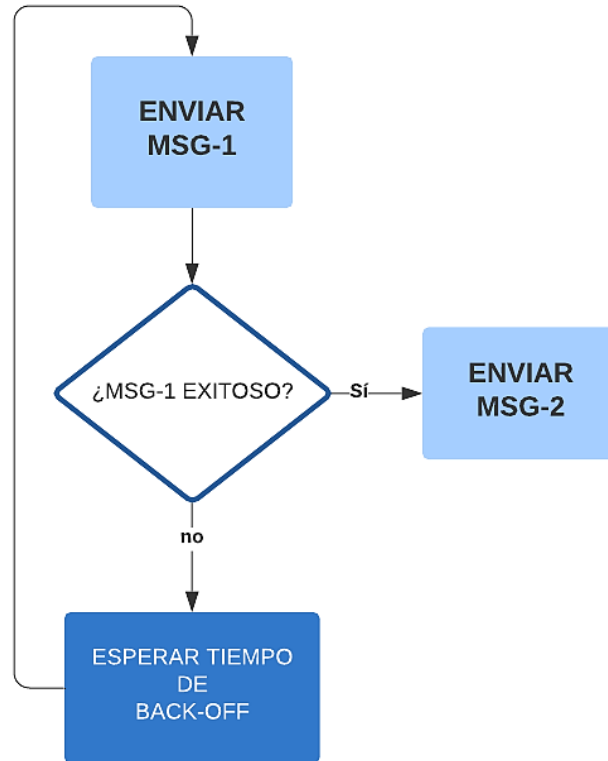


Figura 13. Diagrama de flujo del mecanismo de Back-off
Fuente: Autor

3.8.2.4. Retransmisiones

Tan pronto como un dispositivo envía un preámbulo, espera recibir el mensaje RAR dentro de una ventana de tiempo que tiene una duración preconfigurada establecida por el eNB. Esa ventana se denomina ventana de resolución de disputas y aquí se denota como T_{CRT} . Si un equipo de usuario no recibe el mensaje RAR dentro de esta ventana de tiempo, el procedimiento de RA se considera fallido y por consiguiente se reinicia. El procedimiento puede fallar por las siguientes razones:

- **Colisión:** Si dos o más dispositivos utilizan el mismo sub canal para la transmisión del preámbulo, da como resultado una decodificación fallida de las señales recibidas en la estación base.

- **Condiciones insuficientes:** Para una única transmisión en un grupo de preámbulo, existe la posibilidad de que la estación base no reciba el mensaje con éxito, debido a la baja potencia recibida.

Después de fallar el procedimiento de acceso aleatorio en cualquiera de sus mensajes, es posible reiniciar varias veces según el factor de retransmisión, que define el número máximo de retransmisiones permitidas. En realidad, se define el máximo número de transmisiones globales denotado por R_{max} y R_b y el máximo número de transmisiones por cada nivel de cobertura b .

R_b indica el número de transmisiones posibles en cada nivel, si este supera el número de transmisiones en el nivel en el que se encuentra, mientras el dispositivo no se encuentre en el último nivel y la variable transmisiones globales R_{max} no llega a su último valor, este dispositivo puede realizar un nuevo intento en el siguiente nivel de cobertura. En caso de el dispositivo encontrarse en el último nivel de cobertura este seguiría intentando el acceso hasta que se supere el número de transmisiones globales. En la **Figura 14** se muestra el diagrama de flujo del proceso que realizaría el dispositivo.

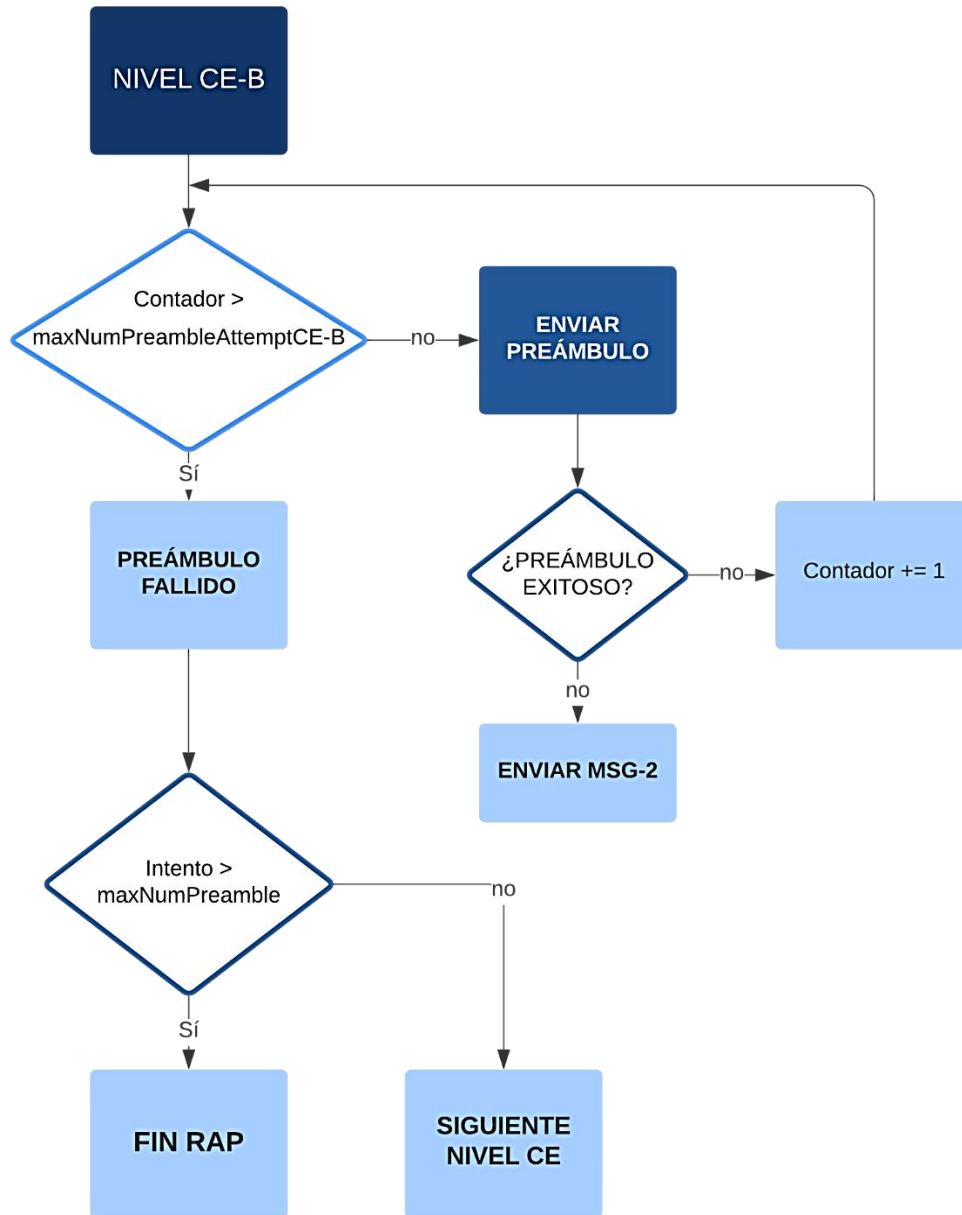


Figura 14. Diagrama de flujo entre el MSG-1 y MSG-2
Fuente: Autor

3.8.2.5. División de subcanales

Los 48 subcanales que están en total disponibles para la transmisión del preámbulo se distribuyen entre los niveles de CE configurados. Dado que cada nivel de CE se caracteriza por un número de repetición diferente, la interferencia mutua correlacionada en el tiempo entre los grupos de símbolos de preámbulo transmitidos es diferente para cada nivel de CE. Por tanto, dependiendo

del tráfico, los subcanales se pueden distribuir entre cada uno de los niveles de CE de tal manera que el efecto combinado de la colisión del preámbulo y la interferencia mutua del preámbulo se minimiza en el sistema NB-IoT.

Para el análisis, denotamos el número de subcanales en CE-0, CE-1 y CE-2, por SC0, SC1 y SC2, respectivamente. En la simulación implementada en esta tesis utilizamos los parámetros de acceso detallados en la **Tabla 7**.

Tabla 7. *Parámetros configurables que intervienen en el mecanismo de restricción de acceso y mecanismo de retroceso*

Fuente: Autor

Parámetros de acceso	Notación	Valor
Factor de restricción de acceso	ρ_{ACB} t_{ACB}	$\rho_{ACB}: 0 \leq \rho_{ACB} \leq 1$ $T_{ACB} \in \{4,8,16, \dots, 512\} s$
Tamaño de la ventana de retroceso	BW	$BW \in \{1024, 2048, 4096, 8192\}ms$
Número de retransmisión en el nivel de cobertura b	TM_b	$TM_b \leq N_b$ donde N_b es el número máximo de RAOS dentro de Tmax
División de subportadoras	$SC: \{SC0, SC1, SC2\}$	Un total de 48 subcanales divididos en tres partes, una para cada nivel CE, SC0, SC1, SC2, como $SC0 + SC1 + SC2 = 48$

3.8.3. Modelo de Sistema NB-IoT

En el sistema NB-IoT considerado existen multi-celdas y multi-usuarios distribuidas en un área de tamaño A. Las estaciones base eNBs y los dispositivos NB-IoT se encuentran distribuidos siguiendo un proceso homogéneo de puntos de poisson independientes (HPPP, Homegeneous Poisson Point Process [24] con intensidad λ_B, λ_D respectivamente, además consideramos un canal de desvanecimiento Rayleigh.

En un solo eNB para un solo nivel de cobertura, el número esperado de dispositivos en la unidad de área, se define como $\frac{\lambda_D}{\lambda_B}$, y para un número específico de niveles de cobertura se define como $\frac{\lambda_{Db}}{\lambda_B}$, donde λ_{Db} es la intensidad de UE NB-IoT en el nivel de cobertura b.

En el modelo planteado, asumimos que las características del sistema cambian periódicamente cada T_{max} , es decir el número de dispositivos se estima mediante el HPPP mencionado anteriormente. Además, en un solo RAO dentro de T_{max} , una parte del total de dispositivos intentará acceder.

Suponemos que la distribución de esos dispositivos en cada RAO dentro del periodo T_{max} puede describirse mediante una distribución Beta. Tomando esto en cuenta, el número de dispositivos que transmitirá su preámbulo para el acceso durante el enésimo RAO esta dado por:

$$\lambda_{Db}(n) = \frac{\lambda_{Db}}{\lambda_B \int_n^{n+1} B(n)dn} \quad (3)$$

donde $B(n)$ corresponde a la distribución beta. Basándose en el procedimiento de acceso aleatorio, en el caso de que el factor AB esté habilitado en el n-ésimo RAO, la estación base ordena a cada dispositivo que ahorre sus transmisiones e intente acceder con probabilidad ρ_{ACB} durante un período t_{ACB} . En consecuencia, la **ecuación 3** se reformula de la siguiente manera.

$$\lambda_{D_s}^{AB}(n) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{P_{AB}\lambda_{Db}}{\lambda_B \int_n^{n+1} B(n)dn} & \text{Si AB está habilitado} \\ \lambda_{Db} / \lambda_B \int_n^{n+1} B(n)dn & \text{Si AB está deshabilitado} \end{array} \right\} \quad (4)$$

Como observamos anteriormente, cada preámbulo ocupa un subcanal para la transmisión de un conjunto de subcanales disponibles dependiendo el nivel de cobertura mejorada en el que se encuentra, para enviar cada uno de los cuatro grupos de símbolos. Calculamos la probabilidad de

éxito de la transmisión del preámbulo. El análisis es válido para cualquier subcanal del RAO y cualquier nivel CE; por lo tanto, definimos el número esperado de dispositivos que transmiten su preámbulo en un solo subcanal de cualquier RAO de la siguiente manera.

$$\lambda_{Preambulo}(n, b) = \frac{\lambda_{D_b}^{AB}(n)}{SC_b, \forall n, \forall b} \quad (5)$$

En el sistema NB-IoT, se produce un éxito de transmisión de preámbulo si al menos una de las repeticiones tiene éxito. Los dispositivos colisionados en un RAO realizarán un mecanismo de retroceso uniforme eligiendo aleatoriamente un valor de ventana de retroceso del conjunto disponible $[0, BW]$. En consecuencia, el cálculo del número esperado de dispositivos en el área de la unidad que transmitirán su preámbulo para el acceso durante el n -ésimo RAO, debe actualizarse cada RAO para incluir las retransmisiones, es decir, el número de dispositivos que han experimentado una colisión y regresan para un nuevo intento de acceso después del proceso de retroceso.

El número esperado de dispositivos en un área unitaria que ha transmitido con éxito el preámbulo en el n -ésimo RAO. viene dado por:

$$\lambda_{D_b, Exitoso}^{AB, BW}(n) = \lambda_{D_b}^{AB, BW}(n) \times P_{RAO}(Rep, n, b) \quad (6)$$

Teniendo en cuenta las transmisiones paralelas en los tres niveles de CE, definimos la probabilidad de éxito del sistema P_{Access} , dada por:

$$P_{Access} = \frac{\sum_{b=0}^2 \sum_{n=1}^{N_b} \lambda_{D_b, Exitoso}^{AB, BW}(n)}{\sum_{b=0}^2 \lambda_{D_b}} \quad (7)$$

Definimos la latencia de acceso D_{Access} como el tiempo promedio requerido para que un dispositivo NB-IoT complete el procedimiento de RA. D_{Access} se puede expresar de la siguiente manera:

$$D_{Access} = \frac{\sum_{b=0}^2 \sum_{n=1}^{N_b} \lambda_{D_b, Exitoso}^{AB, BW}(n) \times T_b \times (n-1)}{P_{Access} \times \sum_{b=0}^2 \lambda_{D_b}} \quad (8)$$

3.8.4. Mecanismo de control de congestión

Para nuestro diseño, el mecanismo de restricción de acceso y el mecanismo de retroceso trabajarán en conjunto con el fin de regular el acceso masivo de dispositivos y para de esta manera aumentar el rendimiento de la red mediante el incremento de la probabilidad de acceso satisfactorio.

El mecanismo de restricción de acceso genera un valor aleatorio, el cual se compara con un valor de umbral de restricción ρ_{ACB} mientras el valor generado no sea menor que el valor de restricción, este mecanismo retrasará la transmisión de preámbulos durante un tiempo, de esta manera solo un cierto número de dispositivos envían su preámbulo, de esta manera se intenta evitar que una mayor cantidad de dispositivos disputen por un subcanal.

Por otro lado, el mecanismo de retroceso actuará en caso de que algún dispositivo falle el procedimiento, este realizará un retraso del próximo intento de transmisión permitiendo volver a calcular el nivel de cobertura, para así ubicarse y utilizar los recursos correctos para que el procedimiento sea exitoso.

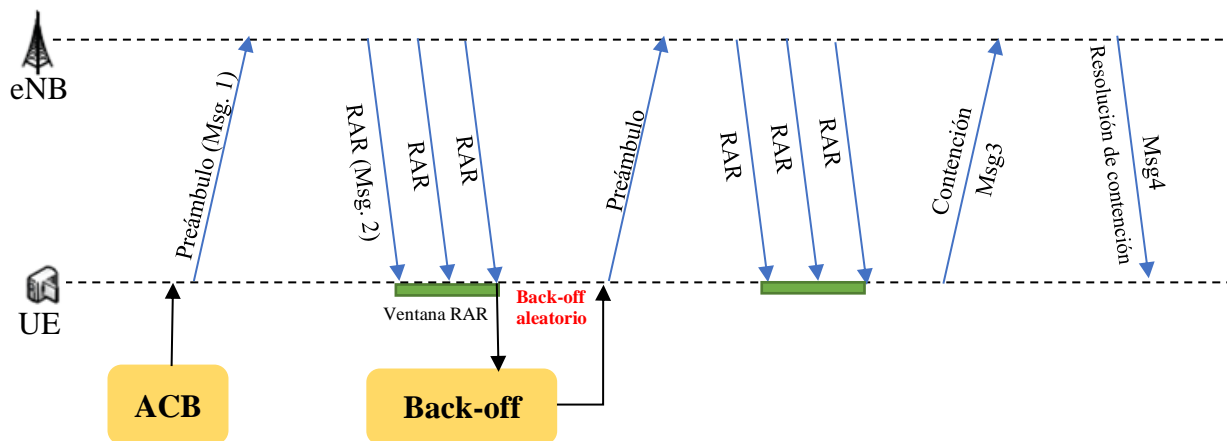


Figura 15. Diseño del mecanismo de control de congestión
Fuente: Autor

En la **Figura 15** tenemos el procedimiento de acceso aleatorio en conjunto con el mecanismo de control de congestión, podemos observar como el mecanismo ACB funciona en el instante antes de que el dispositivo envíe el preámbulo al eNB, mientras que el mecanismo Back-off se activa en el instante en que un dispositivo falla el procedimiento de acceso aleatorio.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Considerando el modelo presentado en el capítulo anterior, se va a realizar el análisis de los resultados obtenidos en términos de probabilidad de éxito de transmisión de preámbulos y latencia mediante simulaciones en Matlab.

4.1. ENTORNO DE RED

El entorno de red implementado se muestra en la **Figura 16**, el análisis se realiza en un canal con desvanecimiento de Rayleigh, el cual representa de manera ideal el medio en el que se encuentran los dispositivos IoT y tecnologías móviles, además de permitirnos analizar valores que se acercan más a la realidad. Este entorno de red, nos permitirá analizar métricas de rendimiento como la probabilidad de acceso satisfactorio y el tiempo de retardo de acceso. Para obtener el mejor rendimiento de la red se evaluará el comportamiento del mecanismo de control de congestión en distintos escenarios variando sus configuraciones de acceso y parámetros de NPRACH.

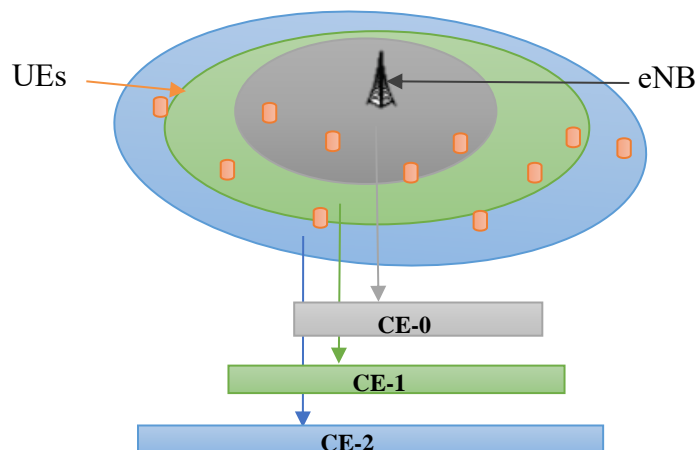


Figura 16. Entorno de red para la evaluación del mecanismo de control planteado

Fuente: Autor

La evaluación se realiza en tres pasos.

- Primero, seleccionamos un conjunto de valores para los parámetros configurables y calculamos el rendimiento variando el proceso de llegada del dispositivo dentro de un período T_{max} .
- El segundo paso, análisis de rendimiento, incluye la cuantificación de la probabilidad de éxito del sistema en un nivel CE para diferentes densidades de red y diversos parámetros de acceso configurables. El resultado principal es un conjunto de valores óptimos para los parámetros de acceso configurables para diferentes densidades de red.
- En el tercer paso, examinamos cómo la decisión sobre la división de las subportadoras disponibles (SC) a los niveles de CE afecta el rendimiento de la red.

4.2. OBTENCIÓN DE RESULTADOS

Se utilizó la librería LTE Toolbox que proporciona funciones y aplicaciones que cumplen con los estándares para el diseño, simulación y verificación de sistemas de comunicaciones LTE, dentro de la cual puede coexistir la tecnología NB-IoT.

4.3. DISTRIBUCIÓN DE DISPOSITIVOS

El sistema cuenta con múltiples usuarios distribuidos dentro de un área (A) de 300 Km² mediante un proceso homogéneo de puntos independientes, el número esperado de dispositivos aumenta periódicamente cada T_{max} segundos dentro de un rango de 0 – 1000 equipos de usuario con incrementos de 100 dispositivos. La **Figura 17** muestra la distribución de los dispositivos dentro del entorno de la red NB IoT.

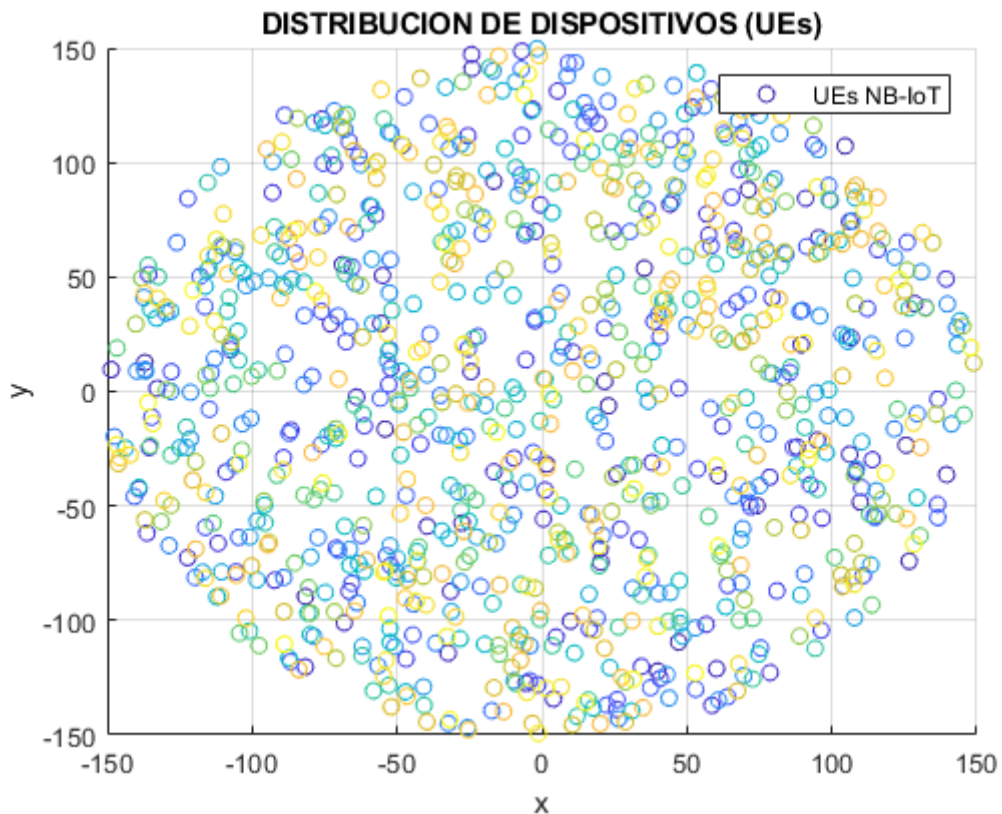


Figura 17. Distribución de dispositivos dentro de un área A de 300 Km² mediante un proceso homogéneo de puntos independientes
Fuente: Autor

4.4. PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO

La probabilidad de acceso satisfactorio es una métrica de rendimiento de gran validez en el análisis de acceso de los dispositivos a la red, esta métrica depende de varios parámetros de los cuales se modifican constantemente para poder analizar y comparar los mejores resultados posibles al igual que se analiza y compara con el procedimiento de acceso aleatorio sin ningún mecanismo de control.

Los parámetros que pueden provocar cambios importantes en la probabilidad de acceso son: el número de repeticiones, el número de retransmisiones, el número de subportadoras, estos dos últimos, dependen de los niveles de cobertura configurados.

Se realiza el análisis cuando el sistema se encuentra configurado en un solo nivel de cobertura y cuando tiene tres niveles de cobertura, de esta manera se puede observar las ventajas y desventajas de dividir nuestros recursos disponibles.

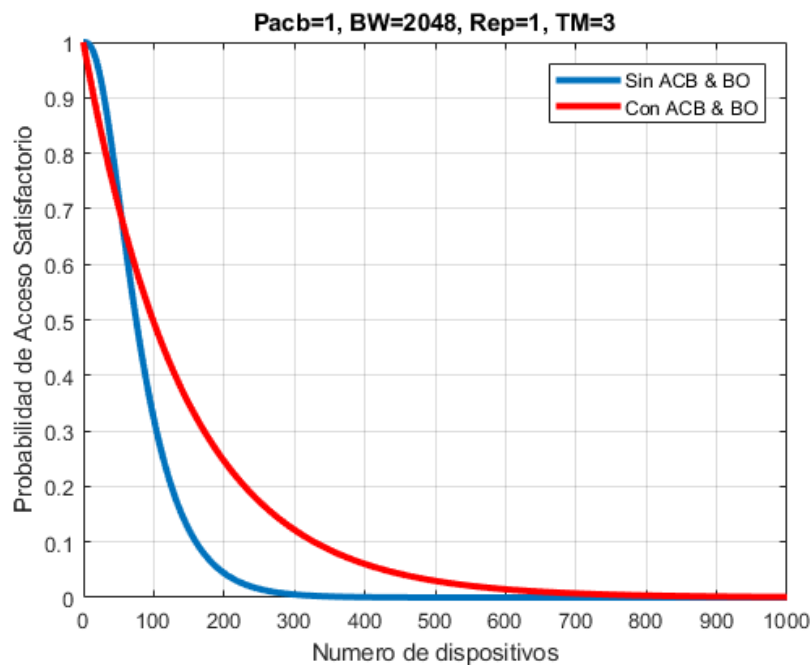


Figura 18. Probabilidad de acceso satisfactorio en un solo nivel de cobertura y 3 retransmisiones, con y sin el mecanismo de control de congestión.

Fuente: Autor

La **Figura 18** muestra la probabilidad de acceso satisfactorio dependiendo el número de dispositivos de llegada de un sistema con un solo nivel de cobertura mejorada. En esta gráfica se observa la probabilidad de acceso satisfactorio con el uso del mecanismo de control de congestión y sin el mecanismo, y se modifica la variable de retransmisiones, con un valor de 3 retransmisiones, cada vez que un dispositivo envía su preámbulo a través de un RAO y esta

comunicación inicial falla a lo largo del procedimiento de acceso aleatorio, interviene esta variable permitiéndole retransmitir un nuevo preámbulo dentro de un RAO diferente y permitiendo que ese dispositivo que en su transmisión anterior fallo la conexión, posea la posibilidad de conectarse exitosamente.

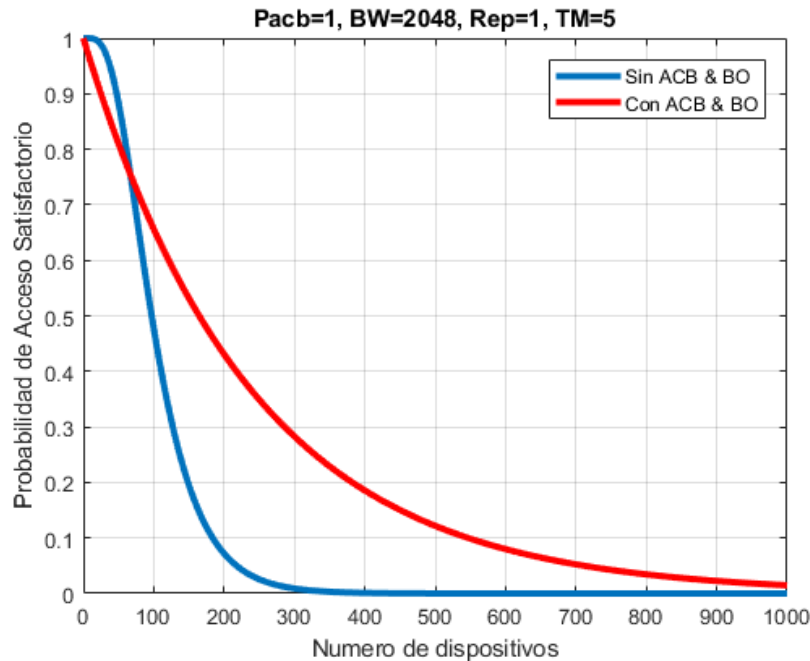


Figura 19. Probabilidad de acceso satisfactorio en un solo nivel de cobertura y cinco retransmisiones, con y sin el mecanismo de control de congestión.

Fuente: Autor

Al incrementar el número de retransmisiones como en la **Figura 19** se puede aumentar la probabilidad de éxito, entre más alto sea el valor de retransmisiones, mayor será la probabilidad de éxito y mayor será la sobrecarga a la red, pero con el mecanismo de control repartimos esa sobrecarga de red a lo largo del tiempo.

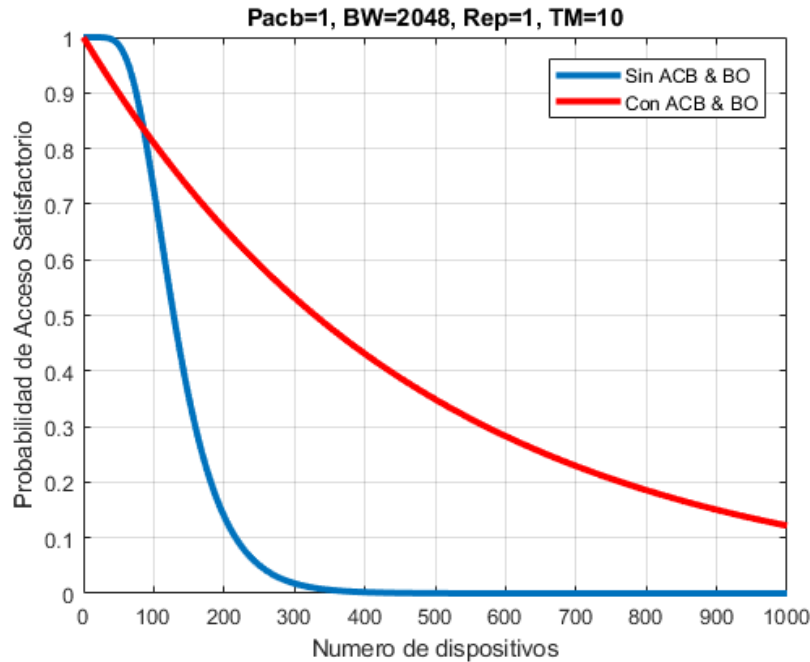


Figura 20. Probabilidad de acceso satisfactorio en un solo nivel de cobertura y diez retransmisiones, con y sin el mecanismo de control de congestión.

Fuente: Autor

En la **Figura 20** se modificó la variable retransmisiones, demostrando que, al aumentar el número de transmisiones, la probabilidad de acceso satisfactorio aumenta, ya que el tener la posibilidad de retransmitir después de haber fallado el procedimiento permite que alguna de esas retransmisiones logre completar con éxito el procedimiento de acceso aleatorio. Como analizamos en el capítulo anterior esta variable puede tomar valores de 1 a 10 dependiendo del entorno de red y se puede configurar un valor diferente para cada nivel de cobertura mejorada.

Cuando un preámbulo falla también interviene el mecanismo de retroceso *BW* el cual define un tiempo de espera uniforme para la retransmisión. Basado en este análisis y considerando los resultados obtenidos podemos evidenciar que la probabilidad de acceso satisfactorio es directamente proporcional al número de retransmisiones y sumado al mecanismo de control de

congestión tiene un aumento significativo de la probabilidad de que complete exitosamente el RAP.

En los resultados de la **Tabla 8**, **Tabla 9** y **Tabla 10** conseguimos incrementar el valor de probabilidad de acceso mediante el incremento del número de retransmisiones a 5, se puede observar que a partir de la llegada de 200 dispositivos tenemos una alta diferencia de la probabilidad de acceso satisfactorio.

Estos resultados nos indican que la probabilidad de acceso satisfactorio con el mecanismo de control de congestión provoca un incremento en comparación al sistema original; no obstante, el incremento de los dispositivos sigue provocando una disminución en la probabilidad de acceso.

Tabla 8. Resultados relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio con y sin el mecanismo de control en un solo nivel de cobertura con 3 retransmisiones

Fuente: Autor

Número de dispositivos	Retransmisiones	Ps sin ACB & BO	Ps con ACB & BO
0	3	1.00	1.00
100	3	0.32	0.49
200	3	0.04	0.24
300	3	0.005	0.12
400	3	0.00	0.06
500	3	0.00	0.12
600	3	0.00	0.02
700	3	0.00	0.01
800	3	0.00	0.01
900	3	0.00	0.01
1000	3	0.00	0.01

En la **Tabla 8** se muestra que al adjuntar el mecanismo de restricción de acceso y el mecanismo del retroceso al procedimiento de acceso aleatorio del estándar 3GPP Release 13, obtenemos un aumento de la probabilidad de acceso con un valor de 3 retransmisiones.

Tabla 9. Resultados relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio con y sin el mecanismo de control en un solo nivel de cobertura con 5 retransmisiones

Fuente: Autor

Número de dispositivos	Retransmisiones	Ps sin ACB & BO	Ps con ACB & BO
0	5	1.00	1.00
100	5	0.47	0.65
200	5	0.07	0.43
300	5	0.01	0.28
400	5	0.009	0.18
500	5	0.001	0.12
600	5	0.00	0.07
700	5	0.00	0.05
800	5	0.00	0.03
900	5	0.00	0.02
1000	5	0.00	0.02

En la **Tabla 9** conseguimos incrementar el valor de probabilidad de acceso mediante el incremento del número de retransmisiones a 5, se puede observar que a partir de la llegada de 200 dispositivos tenemos una alta diferencia de la probabilidad de acceso satisfactorio.

Tabla 10. Resultados relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio con y sin el mecanismo de control en un solo nivel de cobertura con 5 retransmisiones

Fuente: Autor

Número de dispositivos	Retransmisiones	Ps sin ACB & BO	Ps con ACB & BO
0	10	1.00	1.00
100	10	0.72	0.81
200	10	0.13	0.65
300	10	0.01	0.53
400	10	0.002	0.43
500	10	0.00	0.34
600	10	0.00	0.28
700	10	0.00	0.22
800	10	0.00	0.18
900	10	0.00	0.15
1000	10	0.00	0.15

En la **Tabla 10** obtenemos la simulación con un número retransmisiones igual a 10 y nuevamente podemos observar un incremento en comparación a los resultados anteriores, cada vez obtenemos una mayor probabilidad de acceso.

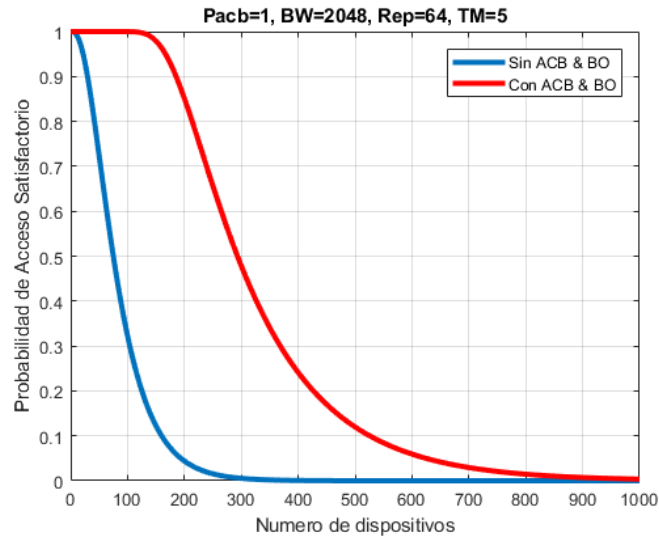


Figura 21. Probabilidad de acceso satisfactorio en un solo nivel de cobertura y 64 repeticiones, con y sin el mecanismo de control de congestión.

Fuente: Autor

Por otro lado, en la **Figura 21** podemos observar los resultados que se obtienen si variamos el número de repeticiones por cada preámbulo, para esta gráfica se definió un valor de 64 repeticiones por preámbulo, al aumentar el valor de esta variable existe una sobrecarga mayor en nuestra red, pero nos permite aumentar considerablemente la probabilidad de acceso satisfactorio.

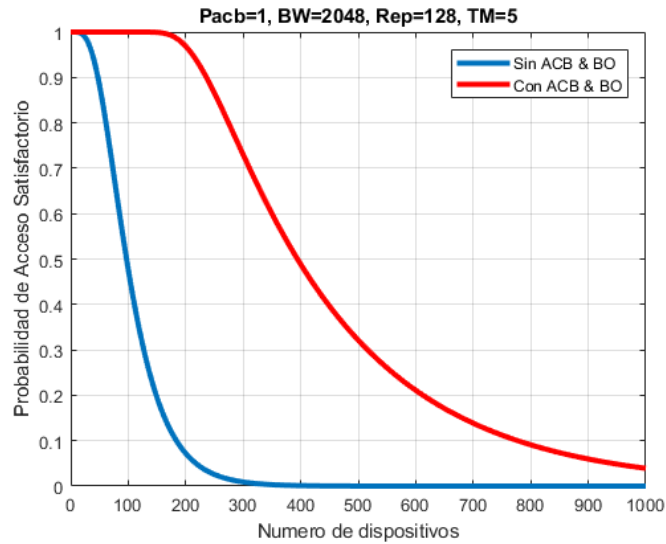


Figura 22. Probabilidad de acceso satisfactorio en un solo nivel de cobertura y 128 repeticiones, con y sin el mecanismo de control de congestión.

Fuente: Autor

En la **Figura 22** variamos el valor de número de repeticiones de 64 de la gráfica anterior por 128, al igual que en la anterior gráfica, en esta podemos observar la probabilidad de éxito versus el número de dispositivos. Similar a la variable retransmisiones, la variable repeticiones permite enviar varios preámbulos del mismo dispositivo; se diferencia en que las repeticiones pueden ser enviadas en el mismo RAO, de manera que la probabilidad de que al menos una de las repeticiones sea exitosa aumenta considerablemente. No obstante, mientras mayor sea el número de repeticiones el tiempo de conexión promedio para un dispositivo va a aumentar, aun así, no deja de ser beneficioso para el éxito de esta comunicación inicial. Se distingue notablemente un aumento en la probabilidad de conexión, de igual manera aquí influye el mecanismo de restricción de clase de acceso ACB, aunque para estos ejemplos el umbral del mecanismo se configuró al máximo para que no exista restricción.

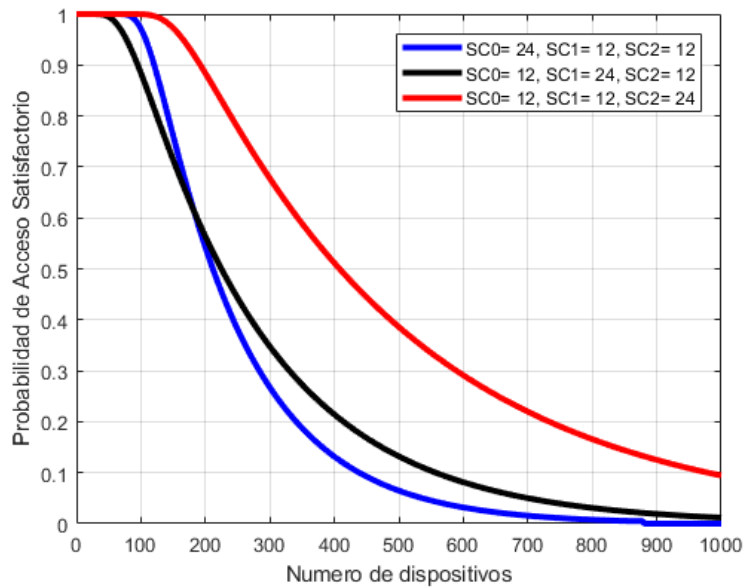


Figura 23. Probabilidad de acceso satisfactorio en tres niveles de cobertura con diferentes valores de subportadoras en cada nivel.
Fuente: Autor

Cuando el sistema es configurado en un solo nivel de cobertura utiliza todos los recursos disponibles, mientras que, si se configura más niveles, los recursos se dividen dependiendo la necesidad de la red. Al crear más niveles de cobertura, podemos aprovechar una de las ventajas de la tecnología NB-IoT que es la conexión de dispositivos de difícil acceso y el dividirlos en clases de cobertura mejora el rendimiento de la probabilidad de acceso, ya que las variables como: número de repeticiones, número de retransmisiones, mecanismo de restricción de clase de acceso y mecanismo de retroceso, se pueden configurar de acuerdo a los requisitos de cada nivel de cobertura. En la **Figura 23** tenemos un sistema con tres niveles de cobertura $CE0$, $CE1$ y $CE2$ con la variable subportadora modificada en cada una de las simulaciones de manera que podamos analizar la mejor distribución de subportadoras para este tipo de comunicaciones masivas en las cuales existen muchos dispositivos que tienen una alta pérdida de ruta por distintos factores del medio. Se puede analizar que la combinación de subportadoras $SC0 = 12$, $SC1 = 12$, $SC2 = 24$

representadas por el color rojo, resulta ampliamente con una mayor probabilidad de acceso sobre las otras combinaciones.

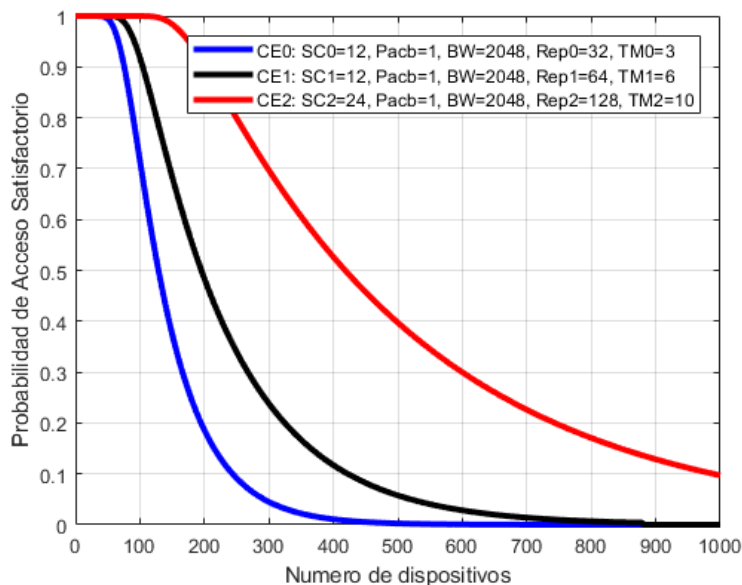


Figura 24. Probabilidad de acceso satisfactorio en tres niveles de cobertura con distintos valores de repetición y retransmisión para cada nivel de cobertura.

Fuente: Autor

En la **Figura 24** se simula tres niveles de cobertura *CE0*, *CE1*, *CE2* con subportadoras diferentes *SC0*, *SC1*, *SC2* con un valor de 12, 12 y 24 respectivamente, el cual es el valor ideal que se encontró en la anterior simulación. Esto sucede porque, como se analizó en capítulos anteriores, el nivel de cobertura *CE2* es el nivel de cobertura extremo, es decir en él se encuentran los dispositivos con menor potencia recibida, por lo cual es más difícil que el dispositivo logre una conexión exitosa al igual que los valores de repetición y retransmisión tiene un valor más alto en este nivel, aunque estos parámetros dependerán en gran parte del escenario de red. Al tener mayores recursos y valores de configuración más altos la probabilidad del nivel *CE2* es mayor en comparación a los otros niveles. Aunque tuviesen la misma configuración, este nivel se mantendría con mayor probabilidad por el hecho de tener mayor cantidad de subportadoras para enviar preámbulos.

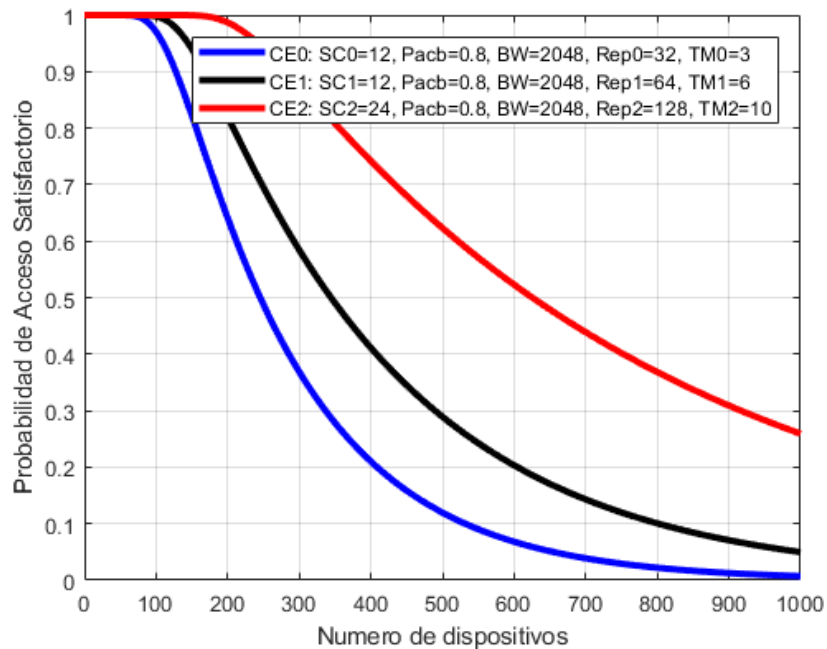


Figura 25. Probabilidad de acceso satisfactorio en tres niveles de cobertura con el mecanismo de restricción de acceso habilitado con un umbral $\rho_{ACB} = 0.8$.

Fuente: Autor

Como se analizó en el capítulo anterior, el mecanismo ACB se activa cuando el eNB detecta que el número de preámbulos superó un umbral de recepción, al activarse los dispositivos que intenten enviar su preámbulo en alguno de los RAOs, posteriormente deberá generar un número aleatorio, si este valor generado es mayor que el umbral de restricción podrá enviar su preámbulo, caso contrario deberá esperar un tiempo para intentar acceder nuevamente. En la **Figura 25** se evidencia que el mecanismo de restricción ACB nos permite una mayor probabilidad de acceso, ya que evita colisiones y sobrecargas en la red.

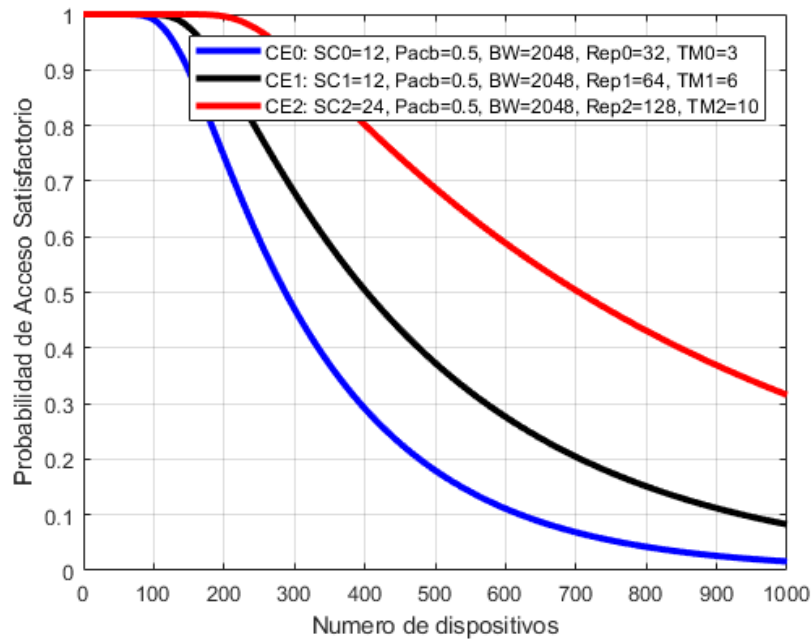


Figura 26. Probabilidad de acceso satisfactorio en tres niveles de cobertura con el mecanismo de restricción de acceso habilitado con un umbral $\rho_{ACB} = 0.5$.

Fuente: Autor

Como muestra la **Figura 26**, mientras el factor de restricción es menor, el número de dispositivos se distribuye durante más tiempo y cada vez existe menos preámbulos fallidos, por tanto, la probabilidad de éxito aumenta.

4.5. TIEMPO DE ACCESO

El tiempo de acceso equivale al tiempo que tarda en completar de manera exitosa el procedimiento de acceso aleatorio, en esta métrica influye variables como $nprach_StartTime$, $nprach_Periodicity$, $Tacb$ y Tbo . Las dos primeras variables dependerán de la configuración del eNB y su valor siempre se adicionará a nuestro tiempo de acceso. Por otro lado, las variables del mecanismo de restricción y retroceso intervendrán solo si el mecanismo entra en acción, caso contrario el valor será de 0.

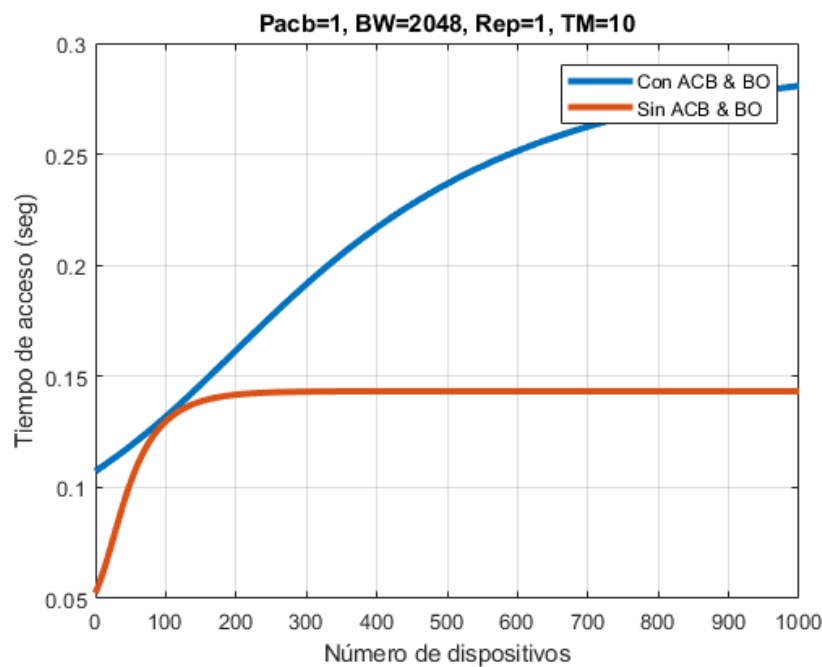


Figura 27. Retardo en el tiempo de acceso en un solo nivel de cobertura con y sin el mecanismo de control de congestión

Fuente: Autor

En la **Figura 27** podemos analizar la simulación del tiempo de acceso dependiendo el número de usuarios. Se puede observar que el mecanismo de restricción de acceso y el mecanismo de retroceso provocan un notable aumento del tiempo en que tarda en completar el procedimiento de acceso aleatorio de manera exitosa, esto es provocado por las constantes repeticiones y retransmisiones que tiene que realizar el preámbulo hasta conseguir acceder, además, del tiempo que tiene que esperar en caso de haber fallado la transmisión.

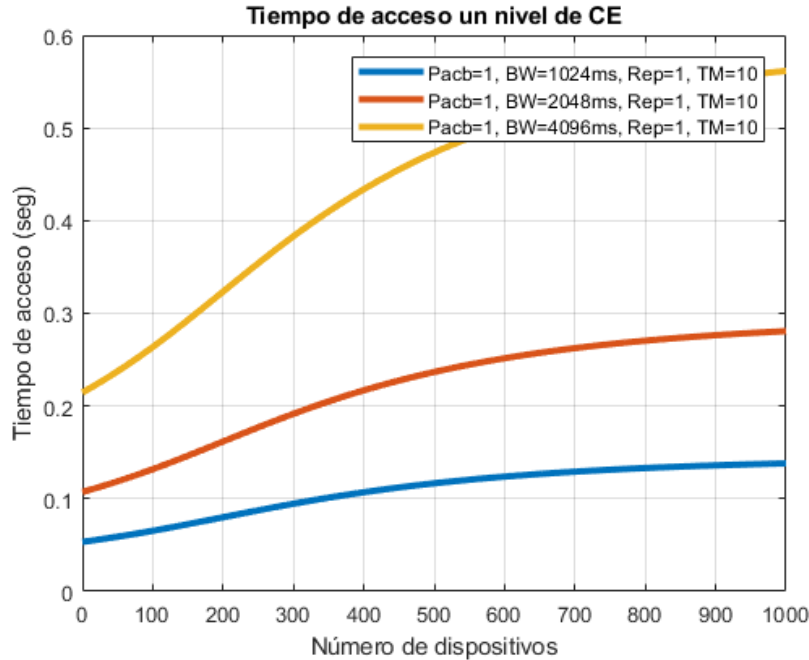


Figura 28. Retardo del tiempo de acceso en un solo nivel de cobertura con diferentes valores del mecanismo de back-off y la variable repeticiones y retransmisiones estable.

Fuente: Autor

En las tres curvas de la **Figura 28** se modificó la variable de espera del mecanismo de retroceso, de esta manera podemos observar el impacto que tiene este retraso de preámbulos, aunque en la probabilidad de acceso satisfactorio pudimos observar un alto rendimiento de este mecanismo al hacer que la sobrecarga de dispositivos se distribuya en el tiempo, en el aspecto del tiempo de acceso produce un incremento del mismo, lo que conlleva a segundos sin conexión para los dispositivos. Utilizando un solo nivel de cobertura no se muestra un valor tan relevante ya que aún se encuentra en la escala de los milisegundos, pero al aumentar el número de repeticiones esta variable también aumentará de manera proporcional, llegando a tener valores muy altos que influirán negativamente en el rendimiento de la red.

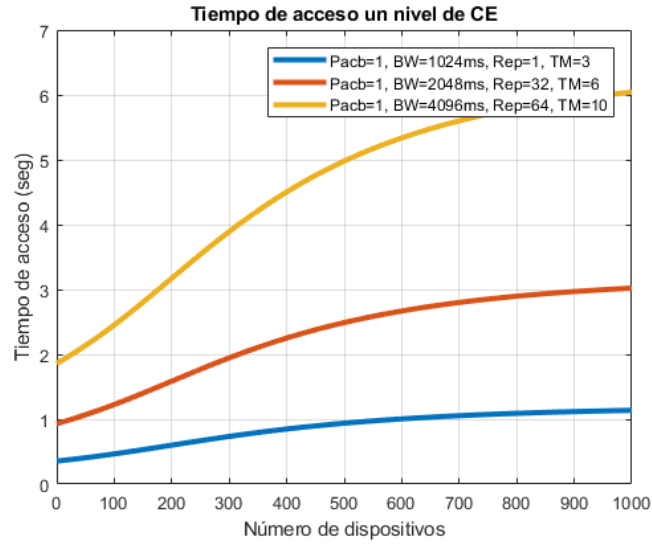


Figura 29. Retardo en el tiempo de acceso en un solo nivel de cobertura, con distintos valores del mecanismo de back-off, repeticiones y retransmisiones

Fuente: Autor

La **Figura 29** utiliza los datos del escenario anterior variando el número de repeticiones y retransmisiones en un solo nivel de cobertura, permitiendo analizar los cambios que provocan estas dos variables, mientras más veces se repita el preámbulo y mientras más retransmisiones necesite el mismo, el tiempo de acceso va aumentando siendo esta una desventaja para el rendimiento de la red.

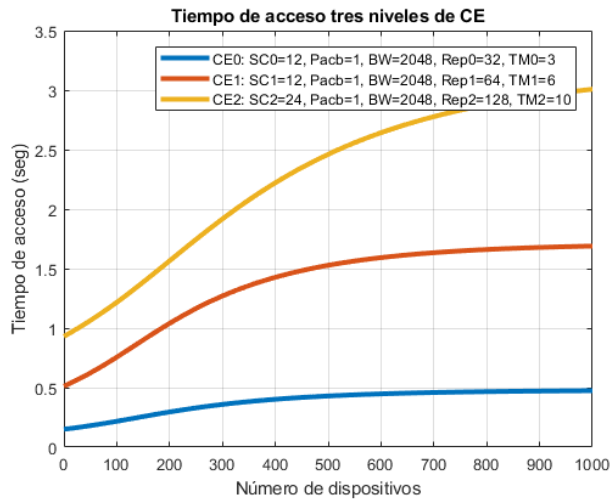


Figura 30. Retardo en el tiempo de acceso para tres niveles de cobertura con valores óptimos en el escenario 1

Fuente: Autor

La **Figura 30** muestra un sistema configurado con tres niveles de cobertura mejorada y $nprach_Periodicity = 40ms$ y $nprach_StartTime = 8ms$. Cada nivel de cobertura tiene su configuración propia, de esta manera podemos observar como el nivel CE-2 que es el de mayor sobrecarga, por tener un número de repeticiones y retransmisiones, tiene un tiempo de acceso elevado, a diferencia el nivel CE-0 y CE-1 tienen un tiempo de sobrecarga bajo en comparación al nivel CE-2 pero, alto en comparación al sistema original que no contiene ningún mecanismo de control.

Las simulaciones anteriores fueron realizadas con los valores del escenario 1 definido en el capítulo anterior. En la **Figura 31** podemos observar el retardo en el tiempo de acceso con un valor de $nprach_Periodicity = 320ms$ y $nprach_StartTime = 64ms$.

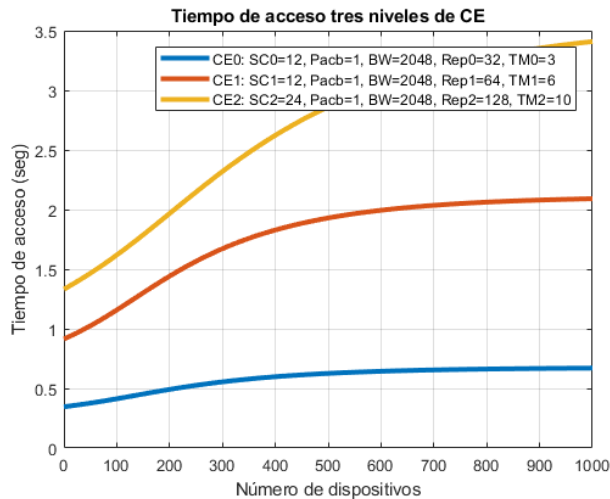


Figura 31. Retardo en el tiempo de acceso para tres niveles de cobertura con valores óptimos en el escenario 2

Fuente: Autor

Las variables de periodicidad y tiempo de inicio intervienen en el retardo del tiempo de acceso y dependiendo de la configuración de cada escenario esto provocara un mayor retardo medido en segundos. Si observamos el escenario 3 mostrado en la **Figura 32** que contiene valores de $nprach_Periodicity = 320ms$ y $nprach_StartTime = 64ms$ mucho más altos en comparación a los

dos escenarios anteriores podemos finalmente determinar que estas variables son importantes para seleccionar valores óptimos.

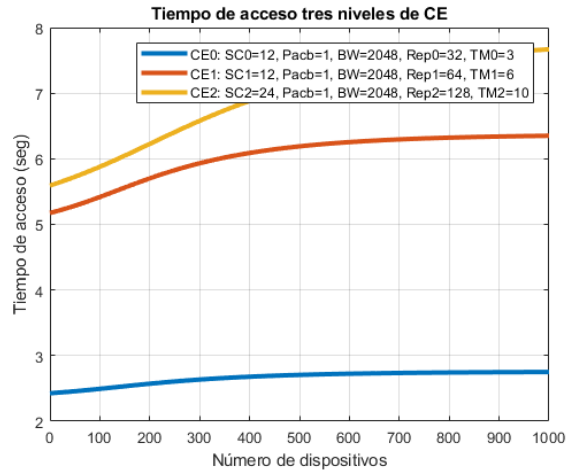


Figura 32. Retardo en el tiempo de acceso para tres niveles de cobertura con valores óptimos en el escenario 3
Fuente: Autor

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Se diseñó un mecanismo de control de congestión para despliegues masivos de comunicaciones masivas mediante el uso en conjunto de dos mecanismos: mecanismo de restricción de acceso y mecanismo de retroceso, adaptándolo al procedimiento de acceso aleatorio del estándar del Release 13 definido por 3GPP, suponiendo un sistema NB IoT con tres niveles de cobertura.
- El proyecto de investigación permitió el análisis de parámetros e información que intervienen para que comunicaciones masivas puedan realizar una comunicación inicial exitosa con el eNB. Dentro de este análisis se identificaron los indicadores de rendimiento como: Probabilidad de acceso satisfactorio y tiempo de acceso. Además, se definieron configuraciones que son compatibles con el Release 13 del estándar, y se obtuvieron valores de las variables *numRepetitionsPerPreambleAttempt* (CE-0: 16, CE-1: 64, CE-2: 128) y *maxNumPreambleAttempt* (CE-0: 3, CE-1: 6, CE-2: 10) que maximizan la probabilidad de éxito del acceso en los diferentes niveles de cobertura, para abordar comunicaciones masivas de tipo máquina.
- Se logró implementar un modelo de simulación del mecanismo de control de congestión planteado, y en base a este estudiar los parámetros que intervienen en la probabilidad de éxito del acceso de los dispositivos, así como el tiempo que tarda en acceder. Mediante esta simulación se pudo observar las ventajas y desventajas que conlleva el colocar un

mecanismo de control que, por un lado, aumenta la probabilidad de que un dispositivo dentro de un área se conecte de manera exitosa pero aumentado el tiempo medio de conexión al mismo.

- De la evaluación del mecanismo de control de congestión bajo diferentes cargas de tráfico concordamos que para las comunicaciones masivas de tipo máquina es muy necesario un mecanismo que regule el acceso para asegurar una mayor probabilidad de éxito. Por nivel de cobertura se consiguió una probabilidad de éxito promedio igual a: (CE-0: 48%, CE-1: 56%, CE-2: 68%), y mediante la distribución eficiente de subportadoras (SC0: 12, SC1: 12, SC2: 24) optimizamos la conexión para dispositivos con baja cobertura. Se evaluó distintos escenarios modificando las variables independientes del mecanismo: factor de restricción y tiempo de retroceso, y las variables del sistema NB IoT del Release 13: número de repeticiones y número de retransmisiones, para resaltar los valores que ofrecen un mayor rendimiento a la red.
- Se concluye que las configuraciones del eNB tienen un gran impacto en la probabilidad de acceso satisfactorio y el mecanismo de restricción en gran parte depende de estas configuraciones para conseguir el punto más alto de eficiencia tanto para un solo nivel de cobertura, como para los tres niveles de cobertura. En ambos casos el mecanismo consiguió aumentar considerablemente la probabilidad de acceso satisfactorio para la llegada masiva de dispositivos.

5.2. RECOMENDACIONES

- Utilizar el software MATLAB versión 2017 en adelante, ya que esta versión dispone de una herramienta LTE la cual proporciona funciones y aplicaciones de acuerdo a estándares ya definidos. Además, nos permite analizar modelos de transmisión y recepción con instrumentos de RF.
- Para futuras investigaciones se recomienda analizar mecanismos más inteligentes que permitan la toma de decisiones dependiendo del escenario de red, llegada de dispositivos, nivel de cobertura, para así, obtener la mejor combinación de configuraciones para cada evento y poder abordar la masividad de dispositivos de internet de las cosas que se conectarán en un futuro, no solo a la red NB IoT, sino a las distintas redes dentro de esta rama.
- Se recomienda estudiar versiones que no han sido estandarizadas pero que son desarrolladas por los mismos autores y/o coautores de los distintos estándares ya definidos por 3GPP.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. V. Dudhe, N. V. Kadam, R. M. Hushangabade, and M. S. Deshmukh, “Internet of Things (IOT): An overview and its applications,” in *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing, ICECDS 2017*, 2018, pp. 2650–2653.
- [2] R. Vidhya and P. Karthik, “Coexistence of cellular IOT and 4G networks,” in *Proceedings of 2016 International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies, ICACCCT 2016*, 2017, pp. 555–558.
- [3] W. Yang *et al.*, “Narrowband Wireless Access for Low-Power Massive Internet of Things: A Bandwidth Perspective,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 138–145, 2017.
- [4] A. Díaz Zayas, P. Merino Gómez, and F. J. Rivas Tocado, “3GPP NB-IoT, tecnología y herramientas de medida,” 2017, pp. 310–317.
- [5] Q. Technologies, “Leading The World To 5G,” 2016.
- [6] Ericsson, “Mobility Report (June 2019),” 2019.
- [7] 3GPP, “TR 37.868 v11 Study on RAN Improvements for Machine-type Communications,” *Technical Specification Group Radio Access Network*; , vol. 0, no. Release 11. p. 7, 2014.
- [8] T. Taleb and A. Kunz, “Machine type communications in 3GPP networks: potential, challenges, and solutions,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 3, pp. 178–184, 2012.
- [9] Telefónica, “Informe Things Matter 2019,” España, 2019.
- [10] Cisco Inc., “Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022,” 2019.
- [11] 3GPP, “TS 36.321 - Medium Access Control (MAC) protocol specification,” *Eur. Telecommun.*, vol. 13, 2018.
- [12] R. Minerva, A. Biru, and D. Rotondi, “Towards a Definition of the Internet of Things (IoT),” 2015.
- [13] IEEE, “Special Report: The Internet of Things,” 2014.
- [14] R. Ratasuk, N. Mangalvedhe, Y. Zhang, M. Robert, and J. P. Koskinen, “Overview of narrowband IoT in LTE Rel-13,” in *2016 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking, CSCN 2016*, 2016, pp. 1–7.
- [15] M. Chen, Y. Miao, Y. Hao, and K. Hwang, “Narrow Band Internet of Things,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 20557–20577, 2017.
- [16] 3GPP, “TS 22.368 Service requirements for Machine-Type Communications (MTC); Stage 1,” *Tech. Specif.*, no. V13.2.0, p. 25, 2017.
- [17] L. Tello-Oquendo, I. Leyva-Mayorga, V. Pla, J. Martinez-Bauset, and V. Casares-Giner, “Analysis of LTE-A Random Access Procedure: A Foundation to Propose Mechanisms for Managing the M2M Massive Access in Wireless Cellular Networks ?,” *Proc. Work. Innov. Inf. Commun. Technol.*, no. July, pp. 95–104, 2015.
- [18] D. Pacheco-Paramo, L. Tello-Oquendo, V. Pla, and J. Martinez-Bauset, “Deep reinforcement learning mechanism for dynamic access control in wireless networks handling mMTC,” *Ad Hoc Networks*, vol. 94, 2019.
- [19] 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.

- [20] L. Tello-Oquendo, V. Pla, I. Leyva-Mayorga, J. Martinez-Bauset, V. Casares-Giner, and L. Guijarro, "Efficient random access channel evaluation and load estimation in LTE-A with massive MTC," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 2, pp. 1998–2002, 2019.
- [21] S. Martiradonna, G. Piro, and G. Boggia, "On the evaluation of the NB-IoT random access procedure in monitoring infrastructures," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 14, 2019.
- [22] G. H. Baracat and J. M. C. Brito, "NB-IoT Random Access Procedure Analysis," *Proc. - 2018 10th IEEE Latin-American Conf. Commun. LATINCOM 2018*, 2019.
- [23] R. Harwahyu, R. G. Cheng, C. H. Wei, and R. F. Sari, "Optimization of Random Access Channel in NB-IoT," *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, no. 1, pp. 391–402, Feb. 2018.
- [24] Cisco Inc., "Cisco: 2020 CISO Benchmark Report," *Comput. Fraud Secur.*, vol. 2020, no. 3, p. 4, 2020.
- [25] 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. 67, no. 4, pp. 3505–3520, 2018.
- [26] D. Pacheco-Paramo and L. Tello-Oquendo, "Delay-aware dynamic access control for mMTC in wireless networks using deep reinforcement learning," *Comput. Networks*, vol. 182, no. June, p. 107493, 2020.

ANEXOS

Anexo 1

Uso de LTE Toolbox

La red NB-IoT usa las bandas celulares de comunicación y se ha diseñado para operar de distintas formas, usando la banda de LTE y por lo tanto compartiéndola (in-band) o utilizando el espaciado que hay entre los canales LTE para aprovechar al máximo el espectro de comunicaciones (guard-band).

Mediante LTE Toolbox nos permite realizar las siguientes funciones:

- Generación de formas de onda
- Simulación de nivel de enlace
- Prueba y medición de señales
- Recuperación de señales
- NB-IoT y LTE-M

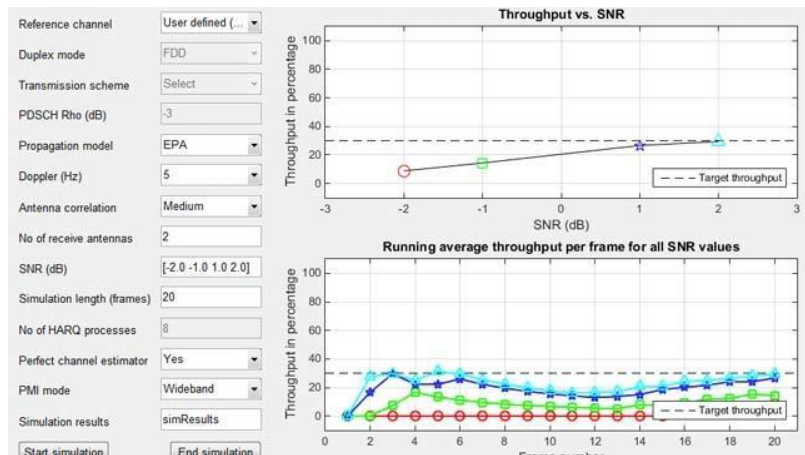


Figura 33. Prueba de rendimiento del canal PDSCH con LTE Toolbox

Fuente: Matlab LTE Toolbox

Entre ellas nos permite explorar aplicaciones máquina a máquina (M2M) y modelar las señales de transporte y físicas de enlace ascendente y descendente de Internet de las cosas de banda estrecha (NB-IoT). En este apartado la herramienta nos permite:

- Generación de formas de onda de enlace ascendente NB-IoT
- Detección de UE mediante señales de enlace descendente

- Simulación de la tasa de error de bloque de NPDSCH para NB-IoT

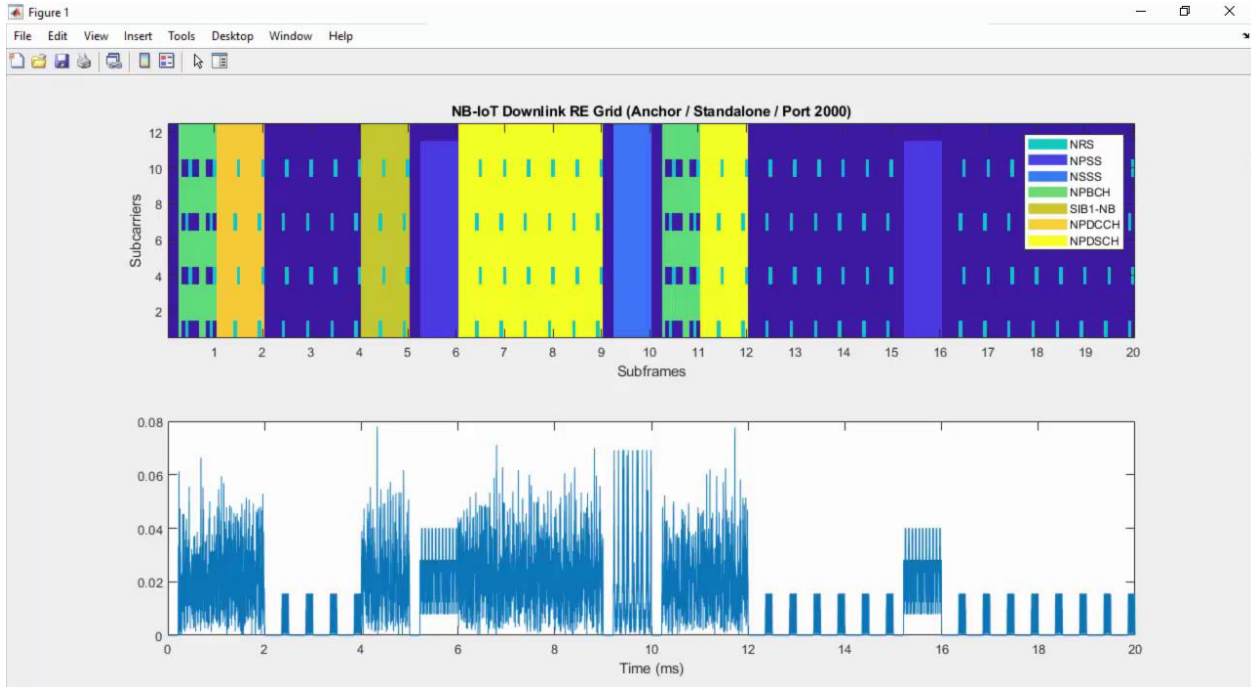


Figura 34. Estructura de preámbulo NB-IoT con LTE Toolbox
Fuente: Matlab LTE Toolbox

Para el uso de esta herramienta necesitamos la plataforma de cómputo numérico Matlab versión 2017b en adelante, la cual contiene esta herramienta necesaria para realizar la simulación del sistema NB IoT.

Anexo 2

Valores de configuración óptimos

Tabla 11. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio dependiendo de la distribución de subportadoras en los niveles de cobertura mejorada y selección de configuración óptima.

Fuente: Autor

Número de dispositivos	Distribución de subportadoras	Ps promedio con ACB & BO
0 – 1000	SC0: 24 SC1: 12 SC2: 12	0.27
	SC0: 12 SC1: 24 SC2: 12	0.30
	SC0: 12 SC1: 12 SC2: 24	0.47

Tabla 12. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio dependiendo del número de repeticiones por cada nivel de cobertura mejorada y selección de configuración óptima.

Fuente: Autor

Número de dispositivos	Nivel de cobertura	Número de subportadoras SC	Número de repeticiones	Ps promedio con ACB & BO
0 - 1000	CE-0	12	8	0.10
			16	0.12
			32	0.11
	CE-1	12	16	0.13
			32	0.15
			64	0.17
	CE-2	24	64	0.20
			128	0.25

Tabla 13. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio dependiendo del número de retransmisiones en cada nivel de cobertura mejorada y selección de configuración óptima.

Fuente: Autor

Número de dispositivos	Nivel de cobertura	Número de subportadoras SC	Número de repeticiones	Número de retransmisiones	Ps promedio con ACB & BO
0 - 1000	CE-0	12	32	1	0.12
				3	0.19
				5	0.18
	CE-1	12	64	1	0.17
				3	0.19
				6	0.26
	CE-2	24	128	1	0.25
				6	0.27
				10	0.35

Tabla 14. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio dependiendo del factor de restricción de acceso para cada nivel de cobertura y selección de configuración óptima.

Fuente: Autor

UEs	CE	SC	Rep	TM	ACB factor	Ps promedio con ACB & BO
0 - 1000	CE-0	12	32	3	0.8	0.34
					0.5	0.35
	CE-1	12	64	6	0.8	0.42
					0.5	0.47
	CE-2	24	128	10	0.8	0.48
					0.5	0.52

Tabla 15. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio dependiendo del tiempo de back-off para cada nivel de cobertura y selección de configuración óptima

Fuente: Autor

UEs	CE	SC	Rep	TM	ACB factor	Back-off (ms)	Ps promedio con ACB & BO
0 - 1000	CE-0	12	32	3	0.8	2048	0.35
					0.5	4096	0.48
	CE-1	12	64	6	0.8	2048	0.47
					0.5	4096	0.56
	CE-2	24	128	10	0.8	2048	0.52
					0.5	4096	0.68