



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**IMPACTO DEL BLOQUEO DE ACCESO POR CLASE EN EL  
RETARDO DE LAS COMUNICACIONES IOT EN  
ESCENARIOS DE ALTO TRÁFICO**

**Trabajo de Titulación para optar al título de:  
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Autor:**

Castillo Batallas Sebastian Javier

**Tutor:**

PhD. Luis Patricio Tello Oquendo

**Riobamba, Ecuador. 2023**

## DERECHOS DE AUTORÍA

Yo, **Castillo Batallas Sebastian Javier**, con cédula de ciudadanía **0604239632**, autor del trabajo de investigación titulado: **“IMPACTO DEL BLOQUEO DE ACCESO POR CLASE EN EL RETARDO DE LAS COMUNICACIONES IOT EN ESCENARIOS DE ALTO TRÁFICO”**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

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

En Riobamba, 10 de noviembre de 2023.



---

Castillo Batallas Sebastian Javier  
C.I: 0604239632

## DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Tutor y Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **“Impacto del Bloqueo de Acceso por Clase en el Retardo de las Comunicaciones IoT en Escenarios de Alto Tráfico”**, presentado por **Castillo Batallas Sebastian Javier**, con cédula de identidad número **060423963-2**, certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha asesorado durante el desarrollo, revisado y evaluado el trabajo de investigación escrito y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 10 de noviembre de 2023.

Msc. Giovanni Cuzco Silva  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO**



---

Msc. Alejandra Pozo Jara  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**



---

PhD. Antonio Meneses Freire  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**



---

PhD. Luis Tello Oquendo  
**TUTOR**



---

## CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “**Impacto del Bloqueo de Acceso por Clase en el Retardo de las Comunicaciones IoT en Escenarios de Alto Tráfico**” presentado por **Castillo Batallas Sebastian Javier**, con cédula de identidad número 060423963-2, bajo la tutoría de PhD. Luis Tello Oquendo; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

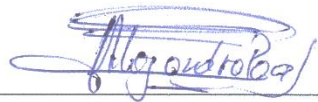
De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 10 de noviembre de 2023.

**Presidente del Tribunal de Grado**  
Msc. Giovanni Cuzco Silva



---

**Miembro del Tribunal de Grado**  
Msc. Alejandra Pozo Jara



---

**Miembro del Tribunal de Grado**  
PhD. Antonio Meneses Freire



---



Dirección  
Académica  
VICERRECTORADO ACADÉMICO



UNACH-RGF-01-04-02.20  
VERSIÓN 02: 06-09-2021

## CERTIFICACIÓN

Que, **CASTILLO BATALLAS SEBASTIAN JAVIER** con CC: **0604239632**, estudiante de la Carrera **ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES, NO VIGENTE**, Facultad de **INGENIERIA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado " **IMPACTO DEL BLOQUEO DE ACCESO POR CLASE EN EL RETARDO DE LAS COMUNICACIONES IOT EN ESCENARIOS DE ALTO TRÁFICO**", cumple con el **1 %**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **URKUND**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 8 de noviembre de 2023

PhD. Luis Tello Oquendo  
TUTOR TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de tesis se la dedico a mi familia, principalmente a mis padres que con todo el esfuerzo y sacrificio que siempre han hecho para ayudarme a cumplir mis metas y el ejemplo de ellos que para mí es una guía para superar todos los inconvenientes que se presentaron y alcanzar este logro.

También quiero agradecer a mis hermanos que siempre he tenido su apoyo incondicional y siempre agradeceré la confianza en mis habilidades y con su aliento inquebrantable me han dado la fuerza para superar los desafíos y alcanzar mis metas.

*Sebastian Javier Castillo Batallas*

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero agradecer a la Universidad Nacional de Chimborazo y a todos los docentes que durante el camino de mi formación académica me han aportado los conocimientos que hicieron que pueda desarrollarme día a día como profesional y ser humano y agradecer de manera especial al PhD. Luis Tello y a los docentes Evaluadores Msc. Alejandra Pozo y PhD. Manuel Meneses que me ayudaron y guiaron en todo este proyecto de tesis.

Agradecer también a mi familia que con su apoyo constante y amor incondicional han sido el motor que me ayudado en cada paso de este camino. Su presencia ha sido mi mayor fuente de inspiración y estoy profundamente agradecido por tenerlos a mi lado.

*Sebastian Javier Castillo Batallas*

# ÍNDICE GENERAL

DERECHOS DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEBROS DE TRIBUNAL

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESUMEN

ABSTRACT

1.	CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN. ....	17
1.1	Introducción .....	17
1.2	Planteamiento del Problema .....	18
1.3	Justificación .....	19
1.4	Objetivos .....	20
1.4.1	General.....	20
1.4.2	Específicos.....	20
2.	CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO. ....	21
2.1	Estado del Arte.....	21
2.2	Internet de las Cosas – IoT.....	22
2.3	Comunicación tipo máquina – MTC.....	23
2.4	Comunicaciones masivas de tipo máquina – mMTC .....	24
2.5	Red avanzada de evolución a largo plazo – LTE-A .....	24
2.6	Procedimiento de acceso aleatorio (RAP) – Basado en Contención .....	26
2.6.1	Transmisión del Preámbulo (Msg1) .....	27
2.6.2	Respuesta de Acceso Aleatorio (Msg2).....	28
2.6.3	Solicitud de Conexión (Msg3).....	29
2.6.4	Resolución de Contienda (Msg4) .....	30
2.7	Restricción de clase de acceso – ACB .....	30
2.7.1	Probabilidad de Bloqueo ( <b>PACB</b> ) .....	31
2.7.2	Tiempo de Bloqueo ( <b>TACB</b> ) .....	31



2.7.3	Clases De Acceso Definidas por el estándar 3GPP .....	32
3.	CAPÍTULO III. METODOLOGIA.....	33
3.1	Tipo y Diseño de la investigación.....	33
3.1.1	Investigación Exploratoria.....	33
3.2	Métodos y técnicas de investigación.....	33
3.2.1	Método Científico.....	33
3.2.2	Técnica de Recolección de Datos .....	33
3.2.3	Instrumentos de Recolección de Datos.....	34
3.3	Población, Muestra y Métricas de rendimiento .....	34
3.3.1	Población .....	34
3.3.2	Muestra .....	34
3.3.3	Métricas de rendimiento .....	35
3.4	Operacionalización de las variables.....	36
3.5	Procedimiento y Análisis.....	37
3.5.1	Caracterización del Procedimiento de Acceso Aleatorio.....	38
3.5.2	Modelo y Caracterización del Escenario .....	39
3.5.3	Configuración y Evaluación del Canal.....	39
3.5.4	Designación de los Tráficos MTC y HTC.....	40
3.5.5	Configuración del PRACH.....	41
3.5.6	Indicadores clave de rendimiento – KPIs.....	41
3.5.7	Designación del Modelo de Colisión.....	43
3.5.8	Implementación del esquema ACB .....	43
4.	CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
4.1	Resultados: $P_S$ y $D_{95}$ con una carga baja de tráfico de 5000UEs MTC .....	46
4.1.1	Análisis (5000 UEs MTC sin ACB): $P_S$ y $D_{95}$ con un $T_{RAO}$ de 5 ms y 1ms ...	46
4.1.2	Análisis (5000 UEs MTC): $P_S$ y $D_{95}$ con una periodicidad de $T_{RAO} = 5$ ms...	48
4.1.3	Análisis (5000 UEs MTC): $P_S$ y $D_{95}$ con una periodicidad de $T_{RAO} = 1$ ms...	49
4.1.4	Análisis (5000 UEs MTC): $P_S$ y $D_{95}$ óptimos ( $T_{RAO} = 5$ ms VS $T_{RAO} = 1$ ms)	50
4.2	Resultados: $P_S$ y $D_{95}$ con una carga media de tráfico de 15000 UEs MTC .....	51
4.2.1	Análisis (15000 UEs MTC sin ACB): $P_S$ y $D_{95}$ con un $T_{RAO}$ de 5 ms y 1ms .	51
4.2.2	Análisis (15000 UEs MTC): $P_S$ y $D_{95}$ con una periodicidad de $T_{RAO} = 5$ ms.	53
4.2.3	Análisis (15000 UEs MTC): $P_S$ y $D_{95}$ con una periodicidad de $T_{RAO} = 1$ ms.	54
4.2.4	Análisis (15000 UEs MTC): $P_S$ y $D_{95}$ óptimos ( $T_{RAO} = 5$ ms VS $T_{RAO} = 1$ ms)	54
4.3	Resultados: $P_S$ y $D_{95}$ con una carga alta de tráfico de 30000UEs MTC .....	56

4.3.1	Análisis (30000 UEs MTC sin ACB): $P_S$ y $D_{95}$ con un $T_{RAO}$ de 5 ms y 1ms .	56
4.3.2	Análisis (30000 UEs MTC): $P_S$ y $D_{95}$ con una periodicidad de $T_{RAO} = 5$ ms .	58
4.3.3	Análisis (30000 UEs MTC): $P_S$ y $D_{95}$ con una periodicidad de $T_{RAO} = 1$ ms .	60
4.3.4	Análisis (30000 UEs MTC): $P_S$ y $D_{95}$ óptimos ( $T_{RAO} = 5$ ms VS $T_{RAO} = 1$ ms)	62
4.4	Análisis Estadístico de los Resultados de la $P_S$ y $D_{95}$ .....	65
4.4.1	Prueba de Normalidad para la $P_S$ y $D_{95}$ .....	66
4.4.2	Prueba de Hipótesis para la $P_S$ y $D_{95}$ .....	69
5.	CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	74
5.1	Conclusiones.....	74
5.2	Recomendaciones .....	75
	BIBLIOGRAFÍA .....	76
	ANEXOS.....	79

## ÍNDICE DE TABLAS.

<b>Tabla 1.</b> Consideraciones de la <i>PACB</i> .....	31
<b>Tabla 2.</b> Consideraciones de <i>TACB</i> .....	31
<b>Tabla 3.</b> Clases De Acceso Definidas por el estándar 3GPP .....	32
<b>Tabla 4.</b> Instrumentos para la Recolección de Datos del Proyecto de Investigación .....	34
<b>Tabla 5.</b> Operacionalización de las variables del Proyecto de Investigación. ....	36
<b>Tabla 6.</b> Modelos de tráfico propuestos por el estándar 3GPP para dispositivos MTC .....	40
<b>Tabla 7.</b> Configuración de los parámetros del canal de acceso aleatorio. ....	41
<b>Tabla 8.</b> Comparación de la $P_S$ , entre el Modelo de Colisión 1 y 2.....	43
<b>Tabla 9.</b> Resultados de la $P_S$ y del $D_{95}$ sin parámetros ACB y con una carga baja de tráfico de 5000 UEs MTC y un $T_{RAO}$ de 5 ms y 1 ms.....	47
<b>Tabla 10.</b> Resultados: $P_S \geq 0.95$ y $D_{95}$ , bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ , $T_{ACB}$ ) ACB con una carga baja de tráfico de 5000 UEs MTC y un $T_{RAO} = 5$ ms.....	48
<b>Tabla 11.</b> Resultados: $P_S \geq 0.95$ y $D_{95}$ , bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ , $T_{ACB}$ ) ACB con una carga baja de tráfico de 5000 UEs MTC y un $T_{RAO} = 1$ ms.....	49
<b>Tabla 12.</b> Resultados óptimos de la $P_S$ y del $D_{95}$ bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ , $T_{ACB}$ ) ACB con una carga baja de tráfico de 5000 UEs MTC y un $T_{RAO}$ de 5 ms y 1 ms. ....	50
<b>Tabla 13.</b> Resultados de la $P_S$ y del $D_{95}$ sin parámetros ACB y con una carga media de tráfico de 15000 UEs MTC y un $T_{RAO}$ de 5 ms y 1 ms.....	52
<b>Tabla 14.</b> Resultados: $P_S \geq 0.95$ y $D_{95}$ , bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ , $T_{ACB}$ ) ACB con una carga media de tráfico de 15000 UEs MTC y un $T_{RAO} = 5$ ms.....	53
<b>Tabla 15.</b> Resultados: $P_S \geq 0.95$ y $D_{95}$ , bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ , $T_{ACB}$ ) ACB con una carga media de tráfico de 15000 UEs MTC y un $T_{RAO} = 1$ ms.....	54
<b>Tabla 16.</b> Resultados óptimos de la $P_S$ y del $D_{95}$ bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ , $T_{ACB}$ ) ACB con una carga media de tráfico de 15000 UEs MTC y dos $T_{RAO}$ de 5 ms y 1 ms.....	55
<b>Tabla 17.</b> Resultados de la $P_S$ y del $D_{95}$ sin parámetros ACB para una carga alta de tráfico de 30000 UEs MTC y un $T_{RAO}$ de 5 ms y 1 ms.....	57
<b>Tabla 18.</b> Resultados: $P_S \geq 0.95$ y $D_{95}$ , bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ , $T_{ACB}$ ) ACB con una carga alta de tráfico de 30000 UEs MTC y un $T_{RAO} = 5$ ms.....	58
<b>Tabla 19.</b> Resultados: $P_S \geq 0.95$ y $D_{95}$ , bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ , $T_{ACB}$ ) ACB con una carga alta de tráfico de 30000 UEs MTC y un $T_{RAO} = 1$ ms.....	60
<b>Tabla 20.</b> Resultados óptimos de la $P_S$ y del $D_{95}$ bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ , $T_{ACB}$ ) ACB con una carga alta de tráfico de 30000 UEs MTC y dos $T_{RAO}$ de 5 ms y 1 ms.....	62
<b>Tabla 21.</b> Resultados óptimos de la $P_S$ y del $D_{95}$ con $T_{RAO}=1$ ms y $T_{RAO}=5$ ms en escenarios de tráfico masivo. ....	65
<b>Tabla 22.</b> Procesamiento de los datos para la $P_S$ ( $P_{ACB}=0.5$ , $T_{ACB}=4$ s) y $D_{95}$ con un $T_{RAO}=1$ ms y un $T_{RAO}=5$ ms para escenarios con tráfico masivos.....	65
<b>Tabla 23.</b> Prueba de Normalidad de la $P_S$ ( $P_{ACB}=0.5$ , $T_{ACB}=4$ s) con un $T_{RAO}=1$ ms y un $T_{RAO}=5$ ms para escenarios con tráfico masivos.....	67
<b>Tabla 24.</b> Prueba de normalidad del $D_{95}$ ( $P_{ACB}=0.5$ , $T_{ACB}=4$ s) con un $T_{RAO}=1$ ms y un $T_{RAO}=5$ ms para escenarios con tráfico masivos.....	68

<b>Tabla 25.</b> Rangos del $P_S$ ( $P_{ACB}=0.5$ , $T_{ACB}=4s$ ) con un $T_{RAO}=1ms$ y un $T_{RAO}=5ms$ para escenarios con tráficos masivos.....	70
<b>Tabla 26.</b> Resultados de la prueba de U de Mann-Whitney: $P_S$ ( $P_{ACB}=0.5$ , $T_{ACB}=4s$ ) con un $T_{RAO}=1ms$ y un $T_{RAO}=5ms$ para escenarios con tráficos masivos.....	71
<b>Tabla 27.</b> Media del $D_{95}$ ( $P_{ACB}=0.5$ , $T_{ACB}=4s$ ) con un $T_{RAO}=1ms$ y un $T_{RAO}=5ms$ para escenarios con tráficos masivos.....	72
<b>Tabla 28.</b> Resultados de la prueba T-Student para muestras independientes: $D_{95}$ ( $P_{ACB}=0.5$ , $T_{ACB}=4s$ ) con un $T_{RAO}=1ms$ y un $T_{RAO}=5ms$ para tráficos masivos. ....	72
<b>Tabla 29.</b> Presupuesto del Proyecto de Investigación. ....	79
<b>Tabla 30.</b> Resultados Generales: $P_S$ y $D_{95}$ bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ , $T_{ACB}$ ) ACB con un tráfico de 5000 UEs MTC y un $T_{RAO} = 5$ ms.....	79
<b>Tabla 31.</b> Resultados Generales: $P_S$ y $D_{95}$ bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ , $T_{ACB}$ ) ACB con un tráfico de 15000 UEs MTC y un $T_{RAO} = 5$ ms.....	80
<b>Tabla 32.</b> Resultados Generales: $P_S$ y $D_{95}$ bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ , $T_{ACB}$ ) ACB con un tráfico de 30000 UEs MTC y un $T_{RAO} = 5$ ms.....	80
<b>Tabla 33.</b> Resultados Generales: $P_S$ y $D_{95}$ bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ , $T_{ACB}$ ) ACB con un tráfico de 5000 UEs MTC y un $T_{RAO} = 1$ ms.....	81
<b>Tabla 34.</b> Resultados Generales: $P_S$ y $D_{95}$ bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ , $T_{ACB}$ ) ACB con un tráfico de 15000 UEs MTC y un $T_{RAO} = 1$ ms.....	81
<b>Tabla 35.</b> Resultados Generales: $P_S$ y $D_{95}$ bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ , $T_{ACB}$ ) ACB con un tráfico de 30000 UEs MTC y un $T_{RAO} = 1$ ms.....	82

## ÍNDICE DE FIGURAS.

<b>Ilustración 1.</b> Grupos de dispositivos IoT que están reutilizando los recursos celulares de los usuarios (UE) para comunicarse con múltiples dispositivos IoT.....	22
<b>Ilustración 2.</b> Comunicaciones MTC en redes celulares LTE-A, enfocadas a IoT.....	23
<b>Ilustración 3.</b> Escenario general de la Comunicación mMTC .....	24
<b>Ilustración 4.</b> Resumen general de la arquitectura de red LTE-A.....	24
<b>Ilustración 5.</b> Arquitectura general de la red LTE-A. ....	25
<b>Ilustración 6.</b> RAP basado en contención VS RAP libre de contención.....	26
<b>Ilustración 7.</b> Ejemplos de seis configuraciones de PRACH que son determinadas por prach-ConfigIndex.....	27
<b>Ilustración 8.</b> Colisión en la transmisión del Msg1.....	28
<b>Ilustración 9.</b> Colisión en la transmisión del Msg3.....	29
<b>Ilustración 10.</b> Esquema de restricción de clase de acceso (ACB). ....	30
<b>Ilustración 11.</b> Población determinada a través de la distribución Beta ( $\alpha = 3, \beta = 4$ ) y la muestra establecida por los dispositivos que lograron un acceso satisfactorio. ....	35
<b>Ilustración 12.</b> RAP basado en contención para redes LTE-A. ....	38
<b>Ilustración 13.</b> Modelo del escenario del presente proyecto.....	39
<b>Ilustración 14.</b> Diagrama de flujo del algoritmo de funcionamiento del Esquema de control de congestión ACB en el RAP basado en contención para redes LTE-A. ....	42
<b>Ilustración 15.</b> Esquema de control de congestión ACB en el RAP basado en contención para redes LTE-A. ....	44
<b>Ilustración 16.</b> Variables de entrada y resultados de la simulación propuesta en Matlab..	45
<b>Ilustración 17.</b> Número promedio de accesos por RAO sin ACB para una carga baja de tráfico de 5000 UEs MTC y con un $T_{RAO} = 5$ ms.....	46
<b>Ilustración 18.</b> Número promedio de accesos por RAO sin ACB para una carga baja de tráfico de 5000 UEs MTC y con un $T_{RAO} = 1$ ms.....	47
<b>Ilustración 19.</b> Número promedio de accesos por RAO para una carga media de tráfico de 15000 UEs MTC y con un $T_{RAO} = 5$ ms.....	51
<b>Ilustración 20.</b> Número promedio de accesos por RAO para una carga media de tráfico de 15000 UEs MTC y con un $T_{RAO} = 1$ ms.....	52
<b>Ilustración 21.</b> Número promedio de accesos por RAO para una carga alta de tráfico de 30000 UEs MTC y con un $T_{RAO} = 5$ ms.....	56
<b>Ilustración 22.</b> Número promedio de accesos por RAO para una carga alta de tráfico de 30000 UEs MTC y con un $T_{RAO} = 1$ ms.....	57
<b>Ilustración 23.</b> Número promedio de accesos por RAO con un tráfico de 30000 UEs MTC y una configuración de $P_{ACB}=0.5, T_{ACB}=0.4$ y un $T_{RAO} = 5$ ms. ....	59
<b>Ilustración 24.</b> Probabilidad de acceso satisfactorio ( $P_s$ ) bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}, T_{ACB}$ ) ACB con un tráfico de 30000 UEs MTC y un $T_{RAO} = 5$ ms.....	59
<b>Ilustración 25.</b> Retardo en el Acceso ( $D_{95}$ ) bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}, T_{ACB}$ ) ACB con un tráfico de 30000 UEs MTC y un $T_{RAO} = 5$ ms. ....	60
<b>Ilustración 26.</b> Probabilidad de acceso satisfactorio ( $P_s$ ) bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}, T_{ACB}$ ) ACB con un tráfico de 30000 UEs MTC y un $T_{RAO} = 1$ ms.....	61

<b>Ilustración 27.</b> Retardo en el Acceso ( $D_{95}$ ) bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ , $T_{ACB}$ ) ACB con un tráfico de 30000 UEs MTC y un $T_{RAO} = 5$ ms. ....	62
<b>Ilustración 28.</b> Comparación de la $P_S$ con tiempos óptimos en el $D_{95}$ ( $T_{RAO}$ : 5ms VS 1ms) bajo el ajuste de los parámetros ACB y con una carga alta de tráfico de 30000 UEs MTC	63
<b>Ilustración 29.</b> Comparación de los tiempos óptimos del $D_{95}$ ( $T_{RAO}$ : 5ms VS 1ms) bajo el ajuste de los parámetros ACB y con una carga alta de tráfico de 30000 UEs MTC.....	64
<b>Ilustración 30.</b> Comparación del histograma de frecuencia: $P_S$ óptimo bajo el ajuste de los parámetros ACB con un tráfico de 30000 UEs MTC y dos $T_{RAO}$ (1 ms vs 5 ms). ....	66
<b>Ilustración 31.</b> Comparación del histograma de frecuencia: $D_{95}$ bajo el ajuste óptimo de los parámetros ACB con un tráfico de 30000 UEs MTC y dos $T_{RAO}$ (1 ms vs 5 ms). ....	66
<b>Ilustración 32.</b> Diagrama de cajas: $P_S$ bajo el ajuste óptimo de los parámetros ACB con un tráfico de 30000 UEs MTC y dos $T_{RAO}$ (1 ms vs 5 ms). ....	68
<b>Ilustración 33.</b> Intervalo de confianza: $D_{95}$ bajo el ajuste óptimo de los parámetros ACB con un tráfico de 30000 UEs MTC y dos $T_{RAO}$ (1 ms vs 5 ms). ....	69

## RESUMEN

Con el tiempo, la tecnología del Internet de las Cosas (IoT) ha avanzado vertiginosamente, generando desafíos en diversas aplicaciones. La tecnología IoT permite recopilar e intercambiar datos en tiempo real a través de dispositivos inteligentes. Para lograr una conectividad ubicua entre máquinas y dispositivos IoT, se utiliza la comunicación de tipo máquina (MTC). Esta comunicación brinda conexión entre sensores y actuadores a través de tecnologías inalámbricas. Estándares como el Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3GPP), han venido mejorando la tecnología MTC en la red avanzada de evolución a largo plazo (LTE-A). Sin embargo, el aumento de equipos de usuario (UEs) MTC, traen dificultades como la congestión en el canal de acceso aleatorio (RACH) cuando múltiples UEs MTC intentan acceder simultáneamente a la estación base (eNB). Para abordar dicha congestión que se genera en el RACH, el estándar 3GPP recomienda utilizar el esquema de restricción de acceso por clase (ACB) en las redes LTE-A. Este mecanismo de control de congestión, a través del ajuste de los parámetros ACB, como las tasas de restricción ( $P_{ACB}$ ) y los tiempos de restricción ( $T_{ACB}$ ), permiten controlar la congestión y limitar el número de UEs MTC.

En esta investigación, se evalúa el impacto que genera el esquema ACB en el retardo de las comunicaciones IoT que utilizan redes LTE-A con tráfico masivo. Para esta evaluación se utilizan métricas de rendimiento como el retardo en el acceso ( $D_{95}$ ) y la probabilidad de acceso satisfactorio ( $P_S$ ). Además, mediante el ajuste de los parámetros ACB ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) y los parámetros del RACH ( $T_{RAO}$ ), se analiza el rendimiento de la red LTE-A. Para este análisis, se desarrolló un modelo de simulación que integra el procedimiento de acceso aleatorio (RAP) basado en contención y el esquema ACB. El modelo se realizó en el software de Matlab donde se consideró parámetros y configuraciones sugeridas del estándar 3GPP como: tres tráficos (bajo, medio y alto) que siguen una distribución *beta* (3,4), un rango de configuraciones de los parámetros ACB y una variación de periodicidad del RACH ( $T_{RAO}$  {1, 5}ms). En base a estos parámetros de configuración, los resultados obtenidos como la  $P_S$ , debe caracterizarse por ser óptima, es decir,  $P_S \geq 95\%$ . Además, el tiempo del  $D_{95}$  debe ser lo más bajo posible, para así determinar las configuraciones óptimas de los parámetros ACB, que garanticen comunicaciones IoT tolerantes al retardo en escenarios de alta congestión.

**Palabras claves:** IoT, restricción de acceso por clase (ACB), dispositivos MTC, probabilidad de acceso satisfactorio ( $P_S$ ), retardo en el acceso ( $D_{95}$ ), RAP basado en contención.

## ABSTRACT

Over time, Internet of Things (IoT) technology has advanced rapidly, creating challenges in various applications. IoT technology allows data to be collected and exchanged in real time through smart devices. To achieve ubiquitous connectivity between machines and IoT devices, machine type communication (MTC) is used. This communication provides connection between sensors and actuators through wireless technologies. Standards such as the Third Generation Partnership Project (3GPP) have been improving MTC technology in the long-term evolution advanced (LTE-A) network. However, the increase in MTC user equipment (UEs) brings difficulties such as congestion in the random-access channel (RACH) when multiple MTC UEs try to simultaneously access the base station (eNB). To address such congestion generated in the RACH, the 3GPP standard recommends using the access class restriction (ACB) scheme in LTE-A networks. This congestion control mechanism, through the adjustment of ACB parameters, such as restriction rates (PACB) and restriction times (TACB), allows controlling congestion and limiting the number of MTC UEs. In this research, the impact generated by the ACB scheme on the delay of IoT communications that use LTE-A networks with massive traffic is evaluated. For this evaluation, performance metrics such as access delay (D95) and probability of successful access (PS) are used. Furthermore, by adjusting the ACB parameters (PACB, TACB) and the RACH parameters (TRAO), the performance of the LTE-A network is analyzed. For this analysis, a simulation model was developed that integrates the contention-based random-access procedure (RAP) and the ACB scheme. The model was carried out in Matlab software where parameters and suggested configurations of the 3GPP standard were considered such as: three traffics (low, medium, and high) that follow a beta distribution (3,4), a range of configurations of the ACB parameters and a periodicity variation of the RACH (TRAO {1, 5}ms). Based on these configuration parameters, the results obtained as the PS must be characterized as optimal, that is,  $PS \geq 95\%$ . Furthermore, the D95 time should be as low as possible, to determine the optimal configurations of the ACB parameters, which guarantee delay tolerant IoT communications in high congestion scenarios.

**Keywords:** IoT, access class restriction (ACB), MTC devices, probability of successful access (Ps), access delay (D95), contention-based RAP.



Reviewed by:

Msc. Jhon Inca Guerrero.

**ENGLISH PROFESSOR**

C.C. 0604136572



# 1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

## 1.1 Introducción

Con el paso del tiempo, la tecnología del internet de las cosas (*Internet of Things*, IoT) ha progresado significativamente, impulsando múltiples desafíos en numerosas aplicaciones. El objetivo de la tecnología IoT es proporcionar una plataforma que permita recopilar y compartir datos en tiempo real a través de dispositivos inteligentes (monitoreo y control) [1]. Para proporcionar conectividad ubicua entre máquinas y dispositivos IoT, existe la comunicación de tipo máquina (*Machine Type Communication*, MTC) [2].

La comunicación MTC permite realizar conexiones inteligentes, fluidas e interactivas entre sensores, actuadores y diversos sistemas, a través de diferentes tecnologías de comunicación inalámbrica en aplicaciones IoT. MTC ha sido desarrollado y mejorado por diferentes organizaciones de estándares como: IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) y 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*). Principalmente el estándar 3GPP ha realizado mejoras en la tecnología MTC, especialmente para la red avanzada de evolución a largo plazo (*Long Term Evolution Advanced*, LTE-A) [3].

La red celular LTE-A, en comparación con otras redes inalámbricas, tiene mayor capacidad y menor retraso en la transmisión de datos; por consiguiente, la red LTE-A puede proporcionar mayor velocidad de transferencia de datos y una amplia cobertura, logrando de esta manera, escalabilidad en las aplicaciones MTC móviles [3]. Sin embargo, la tecnología MTC con el paso del tiempo, ha traído nuevos desafíos para la red LTE-A, como es el caso del acceso masivo (conectividad inalámbrica de decenas de miles de millones de dispositivos tipo MTC) de los equipos de usuario (*User Equipment*, UE) MTC a la red [4]. En la actualidad, el número de dispositivos de comunicación de tipo máquina (MTC) que se comunican a través de redes LTE-A en entornos IoT, van ascendiendo conforme pasa el tiempo. Por lo tanto, los UEs MTC aumentan significativamente con el propósito de brindar información y servicios ubicuos en escenarios masivos [5].

Las comunicaciones masivas de tipo máquina (*massive Machine Type Communications*, mMTC) tienen como objetivo hacer frente a la posibilidad de que gran cantidad de UEs de tipo MTC, se conecten a la red en un período de tiempo relativamente corto [6]. Es decir, la comunicación mMTC agrupará diferentes aplicaciones MTC, con el fin de brindar servicio en una misma infraestructura donde existe decenas de millones de dispositivos que se encuentran recolectando y gestionando información, a través de las redes celulares LTE, LTE-A y redes de quinta generación (5G) [7]. Por lo cual, es fundamental gestionar eficientemente los recursos de la red en situaciones de sobrecarga. Estas sobrecargas son causadas por los dispositivos que intentan acceder simultáneamente a las estaciones base (conocidos como Nodos B evolucionados, eNB), lo cual generan congestión severa al canal de acceso aleatorio (*Random Access Channel*, RACH) [8].

Para evitar la congestión en el RACH, el estándar 3GPP recomienda aplicar un mecanismo que permita contrarrestar la congestión en las redes celulares. Este mecanismo se denomina restricción de acceso por clase (*Access class barring*, ACB) [9]. Para optimizar la probabilidad de éxito en el acceso a la red, se debe ajustar los parámetros ACB e identificar apropiadamente las combinaciones de las tasas de restricción (*Barring Rates*,  $P_{ACB}$ ) y los tiempos de restricción (*Barring Times*,  $T_{ACB}$ ), de esta forma, se puede controlar la congestión y limitar el número de intentos de acceso simultáneos a ciertos UEs MTC, considerando sus características de tráfico.

En el presente proyecto de investigación, se evaluará el impacto que produce el esquema de control de congestión ACB en escenarios mMTC que se comunican a través de redes LTE-A en entornos de la tecnología IoT. A través de las métricas de rendimiento para una red LTE-A, como el retardo en el acceso ( $D$ ) y la probabilidad de acceso satisfactorio ( $P_S$ ), se podrá estudiar el esquema de control de congestión ACB. Además, los resultados se obtendrán mediante el ajuste adecuado de los parámetros del RACH, como la periodicidad de las oportunidades de acceso aleatorio (*Random Access Opportunity*, RAO). De esta manera, se analizará el desempeño de la red de comunicación LTE-A, bajo la implementación del esquema de control de congestión ACB en escenarios mMTC masivos sugeridos por el estándar 3GPP, además, así se logrando identificar las configuraciones óptimas de los parámetros ACB.

## 1.2 Planteamiento del Problema

Actualmente, la tecnología celular LTE-A se considera como una solución favorable en las comunicaciones IoT en escenarios de tráfico masivo. Sin embargo, la tecnología LTE-A se diseñó para manejar tráfico de persona a persona (H2H), donde pocos dispositivos se comunican simultáneamente entre sí. Por lo tanto, la tecnología LTE-A en escenarios mMTC donde existen gran cantidad de UEs MTC que intentan acceder simultáneamente a las estaciones base, tienden a tener mayor probabilidad de riesgo de que ocurra una congestión severa en el RACH, generando así, un bajo rendimiento tanto para los UEs MTC como para las comunicaciones H2H. Por lo cual, para disminuir esta congestión es necesario limitar el número de intentos de acceso simultáneo de ciertos UEs MTC. Esto se logra mediante la implementación de un esquema de control de congestión viable denominado ACB [5].

Para implementar el mecanismo ACB, se debe tener en cuenta las 16 poblaciones móviles que puede tener cada UE. Las poblaciones móviles se clasifican en tres secciones. La primera sección es la clase de acceso (*Access Class*, AC) para UEs normales que se distribuyen en AC del 0-9. La siguiente sección es el AC 10 y es designado para el acceso a la red de llamadas de emergencia. Por último, está la sección AC 11-15 que son establecidos para UEs de mayor prioridad. Bajo esta consideración de AC, el operador de la red puede restringir a ciertos UEs MTC que intentan ingresar en áreas específicas de una red móvil terrestre pública (*Public Land Mobile Network*, PLMN) [5]. La población móvil de UE normales AC 0-9, habitualmente generan congestión en los escenarios mMTC, debido a la gran cantidad de accesos simultáneos a la eNB.

Por lo cual, es necesario ajustar los parámetros del mecanismo ACB y además identificar las posibles combinaciones del  $T_{ACB}$  y  $P_{ACB}$ , de modo que la repercusión en la calidad servicio (QoS) sea mínima.

Por otra parte, los procedimientos de acceso aleatorio son considerados complejos, ya que poseen una amplia variedad de parámetros de configuración que dificultan la evaluación del rendimiento de la red LTE-A en escenarios de tráfico masivos, es decir, en los procedimientos habitualmente se considera que todas las colisiones suceden en el primer paso del procedimiento de acceso aleatorio (RAP) (al transmitir el Msg1 como lo sugiere el 3GPP). Pero diferentes estudios asumen que todas las colisiones suceden en la transmisión del Msg3. Es claro que el rendimiento de la red LTE-A en escenarios de tráfico masivos puede verse afectado por estas suposiciones, pero cabe destacar que ningún estudio ha comparado directamente estas colisiones [5].

### 1.3 Justificación

Para evitar la congestión en el RACH por los intentos de acceso simultáneos causados por los UEs MTC, el estándar 3GPP sugiere aplicar el mecanismo de control de congestión ACB. Por lo cual, en el presente proyecto de investigación, se llevará a cabo la evaluación del rendimiento de la red celular LTE-A en escenarios de tráfico masivo (mMTC), a través de la implementación del mecanismo ACB.

La evaluación del esquema de control de congestión ACB, se lo realizará, a través de la configuración de los parámetros ACB tales como la probabilidad de bloque  $P_{ACB}$  y el tiempo de bloqueo  $T_{ACB}$ , además, para evaluar el rendimiento de la red LTE-A bajo el mecanismo ACB, se considera las métricas de rendimiento como la probabilidad de acceso satisfactorio ( $P_S$ ) y el retardo en el acceso ( $D$ ) que se basa en el percentil 95 ( $D_{95}$ ). Así mismo, se realizará los procedimientos antes mencionados, pero esta vez, ajustando un rango de parámetros ACB. De esta manera se logrará identificar las configuraciones óptimas de los parámetros ACB, que brinden una distribución adecuada de los UEs MTC hacia la eNB, reduciendo así, las colisiones que se generan en el RACH. También, las configuraciones antes mencionadas representan una solución eficaz que mejora tanto el rendimiento de la red como la fiabilidad en las comunicaciones IoT. Por último, se evaluará el impacto de los resultados obtenidos mediante el ajuste adecuado de los parámetros del RACH como la periodicidad de las oportunidades de acceso aleatorio (RAO) donde se considerarán diferentes escenarios de tráfico masivo (5000, 15000, 30000 UEs MTC).

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 General**

- Evaluar el impacto del bloqueo de acceso por clase en el retardo de las comunicaciones IoT en escenarios de alto tráfico.

### **1.4.2 Específicos**

- Analizar el rendimiento de la red móvil LTE-A en escenarios mMTC masivos considerando la probabilidad de acceso satisfactorio como métrica de análisis.
- Evaluar el desempeño del esquema de restricción de acceso por clase (ACB) en la red móvil LTE-A mediante el ajuste de la probabilidad ACB considerando un rango sugerido por el estándar 3GPP.
- Identificar la configuración óptima de la probabilidad de restricción de acceso por clase (ACB) para maximizar la probabilidad de acceso satisfactorio en un escenario congestionado sugerido por el estándar 3GPP.
- Desarrollar un modelo de simulación en Matlab que permita configurar los parámetros del esquema de restricción de acceso por clase (ACB) para evaluar el impacto en el retardo en el acceso considerando escenarios de alto tráfico.

## 2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

### 2.1 Estado del Arte

En esta sección, se mencionan Artículos Científicos, Investigaciones y estudios relacionados al presente proyecto de tesis. Además, se contemplan investigaciones con un mínimo de cuatro años y a su vez, que se centren en temas como: la probabilidad de acceso satisfactorio ( $P_S$ ), el retardo máximo en el acceso ( $D_{95}$ ) y la configuración de los parámetros ACB ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) en situaciones que demanden escenarios de tráfico masivo en entornos de las comunicaciones IoT a través de las redes LTE-A.

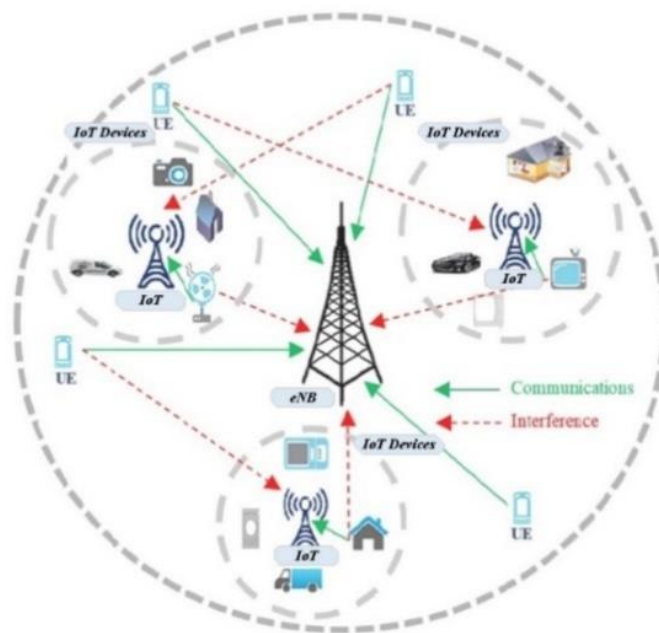
En el estudio [10], los autores Chu Lee, Shang Kao, y otros investigadores, propusieron un esquema de control de congestión ACB basado en una memoria a corto plazo conocida como LSTM. Esta memoria sirve para predecir la carga de tráfico antes de ajustar los parámetros ACB, es decir, por cada carga de tráfico que se predice, se ira ajustando dinámicamente los parámetros ACB. Con este esquema propuesto, los autores lograron obtener una elevada tasa de éxito en el acceso a la eNB, y a su vez, los tiempos del retardo en el acceso no se vieron afectados. También, los autores compararon su enfoque con un esquema ACB dinámico y un esquema ACB basado en RL (aprendizaje por refuerzo) en términos de la tasa de éxito de acceso, el promedio de intentos de acceso y el retraso promedio en el acceso. Los resultados de dicha simulación revelaron que la tasa de éxito en el acceso con el enfoque propuesto superó el 99%. Además, el número promedio de intentos de acceso disminuyó aproximadamente un 6% en comparación con el esquema ACB dinámico, y el retraso promedio en el acceso de los dispositivos M2M se redujo aproximadamente a un 68% en comparación con el esquema ACB basado en RL [10]. Sin embargo, aunque se tenga una probabilidad del 99%, es importante destacar que el estudio [10], no abordó los tiempos máximos de retraso en el acceso. Esta omisión podría resultar negativa, cuando ciertos dispositivos MTC deban esperar tiempos sumamente altos solo para establecer una conexión en la red.

Por otra parte, el estudio [11] se basa en la exploración y la relevancia del esquema ACB y se enfoca en determinar una óptima configuración de los parámetros ACB. Este estudio emplea un conjunto de métricas como el tiempo total de servicio (TST), el retraso en el acceso, la cantidad de dispositivos con demoras en la transmisión, y la probabilidad de éxito. Donde dichas métricas las utilizan para revelar la eficiencia y el rendimiento de la red cuando los dispositivos IoT producen congestión. Los resultados del estudio [11] indican que cuando se emplea un factor ACB constante, los dispositivos IoT se ven obligados a soportar extensos tiempos de espera y demoras en la obtención de recursos. Sin embargo, al optar por parámetros óptimos del esquema ACB, los autores logran incrementar significativamente la probabilidad de éxito y también logran disminuir el retardo en el acceso. Donde dichos resultados brindan un mejoramiento en el desempeño de la red. Asimismo, la investigación descrita no aborda los tiempos máximos de retraso en el acceso y no considera diferentes tipos de periodicidades para el análisis.

Por último en el estudio [12], sus autores proponen el desarrollo de un mecanismo ACB que varía dinámicamente según un modelo de estimación de la carga en situaciones donde conviven dispositivos H2H y M2M. Además, presentan una simulación que contrasta la probabilidad de éxito en el acceso a la red y el retraso promedio durante dicho acceso. Esta simulación incorpora tanto el esquema ACB dinámico propuesto como un esquema ACB estático. Los resultados que obtienen demuestran que el mecanismo ACB dinámico del estudio [12] supera al esquema ACB estático sin afectar el rendimiento de los dispositivos H2H. En resumen, los autores concluyen que tanto el esquema ACB dinámico propuesto como el estático, son capaces de garantizar la probabilidad de éxito en el acceso sin perjudicar el rendimiento de los dispositivos H2H donde coexisten dispositivos H2H y M2M [12]. Sin embargo, es relevante destacar que, en esta investigación el esquema ACB estático presenta dificultades en el uso los recursos de preámbulo, lo que resulta un retraso en el acceso considerablemente alto.

## 2.2 Internet de las Cosas – IoT

EL Internet de las Cosas (IoT), se refiere a todo dispositivo que se encuentre interconectado a la red en tiempo real. Mediante la implementación de dispositivos como, sensores, actuadores y dispositivos electrónicos, se logra generar, compartir y procesar información de manera autónoma, es decir, con poca intervención humana. Además, la tecnología IoT enfatiza diferentes aspectos como la interconexión de redes, la interoperabilidad entre sistemas y la escalabilidad de dispositivos. Sin embargo, es relevante destacar que la tecnología IoT en los ámbitos académicos, industriales y de estandarización, aún no ha conseguido tener un consenso en cuanto a una definición única y universal del concepto de IoT [13].



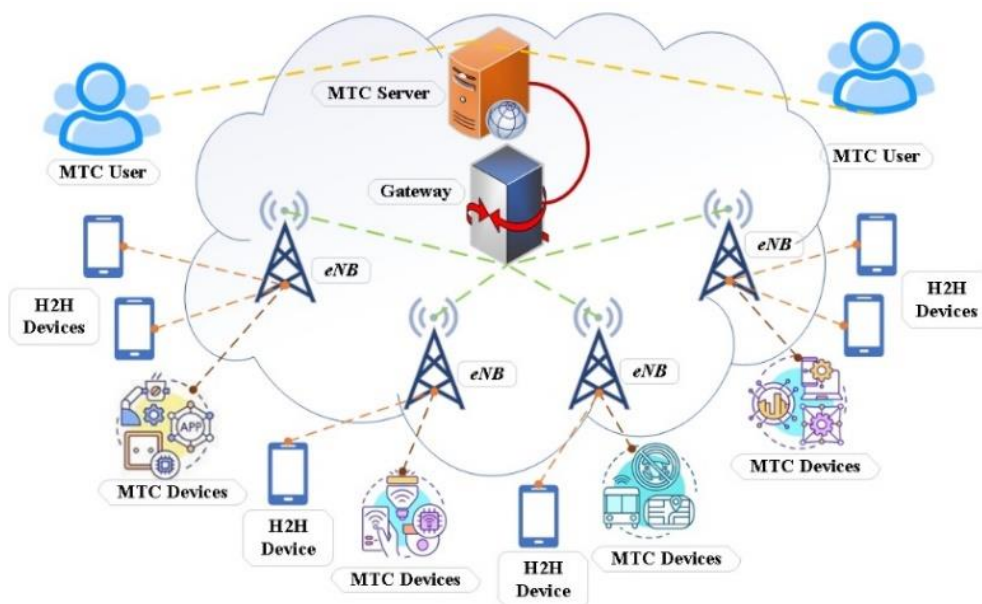
**Ilustración 1.** Grupos de dispositivos IoT que están reutilizando los recursos celulares de los usuarios (UE) para comunicarse con múltiples dispositivos IoT.

**Fuente:**[13]

Para transmitir datos, IoT utiliza diferentes protocolos y tecnologías de comunicación. Principalmente IoT está comprendida por dos tecnologías denominadas alámbricas e inalámbricas. Las tecnologías inalámbricas más comunes para transmitir datos en IoT, son Zigbee, Bluetooth y Wi-Fi, estas tecnologías requieren que los dispositivos IoT, se emparejen a través de un Gateway que disponga de una dirección IP, esta configuración permite a los dispositivos IoT acceder de manera indirecta a Internet. También existen diversas tecnologías de comunicación inalámbricas, tal como las redes móviles (Ilustración 1) o las redes avanzadas de servicio móvil conocidas como redes 3G, 4G y 5G [14].

### 2.3 Comunicación tipo máquina – MTC

La Comunicación de Tipo Máquina (MTC) en el ámbito de las comunicaciones inalámbricas, involucra una gran variedad de dispositivos, sensores y actuadores que operan de manera autónoma, dicho de otra forma, sin intervención humana directa. Actualmente diversas tecnologías de acceso por radio están orientadas hacia la habilitación de MTC. Por lo cual, en la red Evolución a Largo Plazo (LTE), MTC ha emergido como un modo de comunicación de gran relevancia. Además, las investigaciones y el desarrollo de las comunicaciones MTC, está principalmente enfocado a mejorar la compatibilidad con la red LTE [15]. Las ventajas principales de incorporar MTC en la infraestructura de red LTE en aplicaciones IoT, se centra principalmente en aprovechar la infraestructura de red preexistente. Esto reduce los costos operativos y permite a los operadores de red, aprovechar la cobertura, capacidad, y facilidad de integrar dispositivos MTC a la red LTE.



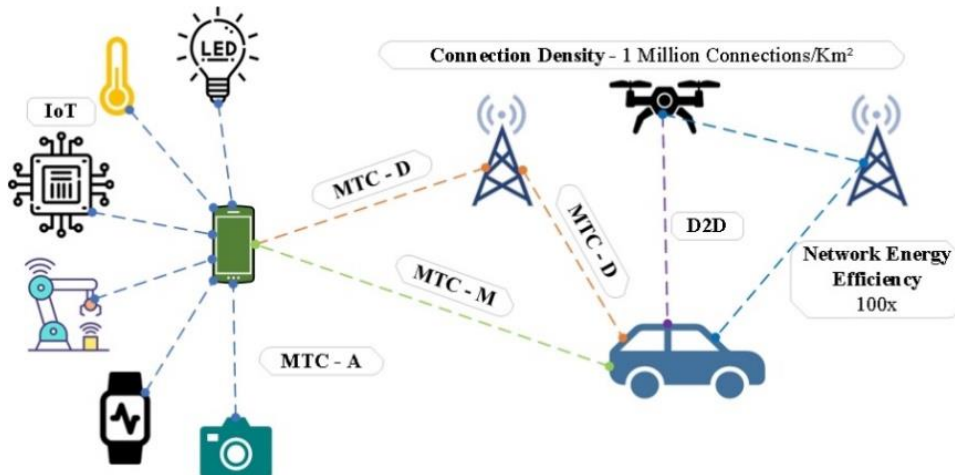
**Ilustración 2.** Comunicaciones MTC en redes celulares LTE-A, enfocadas a IoT.

**Fuente:** Autor

A pesar de la alta capacidad que LTE proporciona, las actuales redes LTE/LTE-A (*Long Term Evolution Advanced*) están diseñadas principalmente para comunicaciones entre humanos (H2H). Para aprovechar eficientemente la capacidad de la red como se indica en la Ilustración 2, existe una renovación en la arquitectura de red LTE-A que permite dar soporte a aplicaciones MTC de manera efectiva [16].

## 2.4 Comunicaciones masivas de tipo máquina – mMTC

La UIT (*Unión Internacional de Telecomunicaciones*), ha definido a los dispositivos MTC masivos (mMTC), como el número elevado de dispositivos conectados a la red. La mMTC está diseñada para brindar una conectividad escalable y eficiente de grandes cantidades de dispositivos que envían paquetes cortos [17].



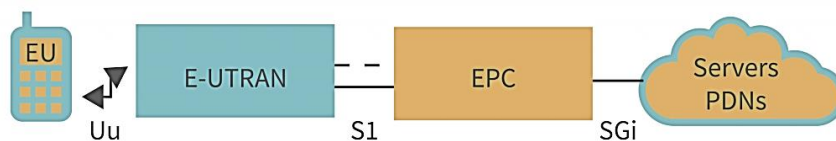
*Ilustración 3. Escenario general de la Comunicación mMTC*

*Fuente:*[18]

La mMTC integra diferentes tecnologías de comunicación que están optimizadas para tener una comunicación eficiente, donde los dispositivos son de bajo costo y consumo. También se consideran dispositivos de tipo mMTC (Ilustración 3) a dispositivos IoT, sensores y dispositivos de tipo máquina [19].

## 2.5 Red avanzada de evolución a largo plazo – LTE-A

La red LTE-A también conocida como 4.5G, se le considera como una puerta de enlace entre la red LTE (4G) y la red 5G. La red LTE-A (Ilustración 4) fue presentada por el estándar 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) en la versión 10 (RL10) en el año 2012.



*Ilustración 4. Resumen general de la arquitectura de red LTE-A.*

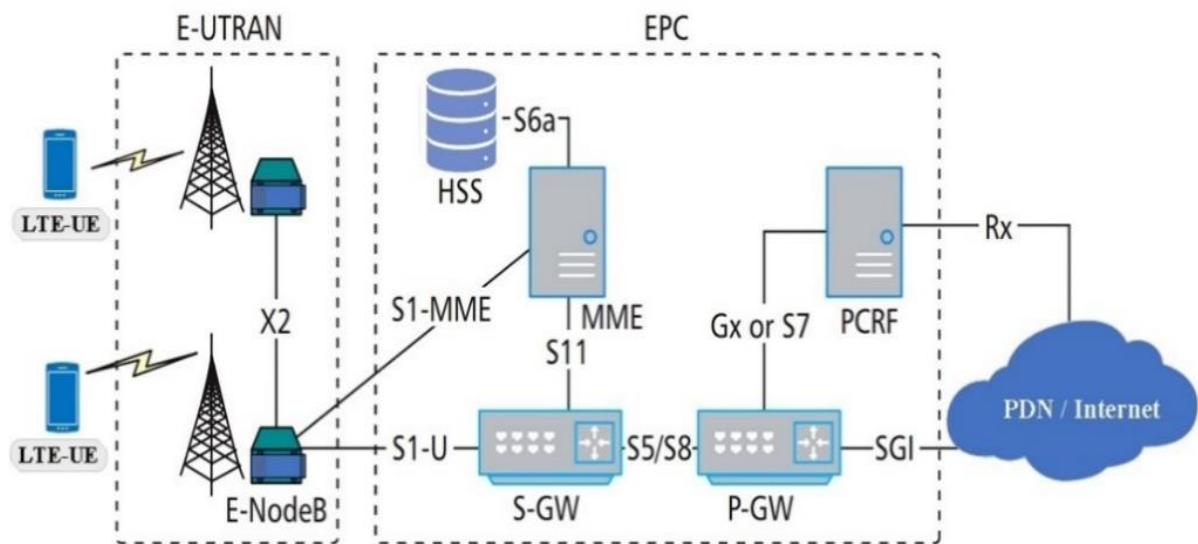
*Fuente:* Autor

Por consiguiente, la red LTE-A constituye una progresión del estándar LTE con complementos funcionales diseñados para permitir la incorporación progresiva de nuevas capacidades en las redes LTE existentes. Además, LTE-A se desarrolló con el propósito fundamental de mejorar el rendimiento, la cobertura y la capacidad de la red LTE. También, dicha red está enfocada en reducir la interferencia en la transmisión ascendente. En el ámbito de las telecomunicaciones, LTE-A es ampliamente reconocido como la verdadera red de cuarta generación [20].



Como se observa en la Ilustración 5, la arquitectura LTE/LTE-A integra dos entidades principales. La primera entidad, es la Red de Acceso de Radio Terrestre Universal Avanzada (E-UTRAN) y es la red de acceso de radio para los equipos de usuario (UE). La segunda entidad es el núcleo de Paquete Avanzado (EPC) y constituye al núcleo de la red. Por otra parte, la arquitectura de red central se la denomina Evolución de la Arquitectura de Servicio (SAE), y la agrupación de E-UTRAN y EPC se la conoce como Sistema de Paquetes Avanzado (EPS) [20].

En la arquitectura LTE, los UE se conectan al EPC a través de E-UTRAN. El EPC incluye entidades tales como la Entidad de Gestión de Movilidad (MME), la Puerta de Enlace de Servicio (SGW), la Puerta de Enlace de Red de Paquetes de Datos (P-GW), el Servicio de Abonado Doméstico (HSS), el Centro de Autenticación (AuC) y la Función de Reglas de Cobro de Políticas (PCRF)[20].



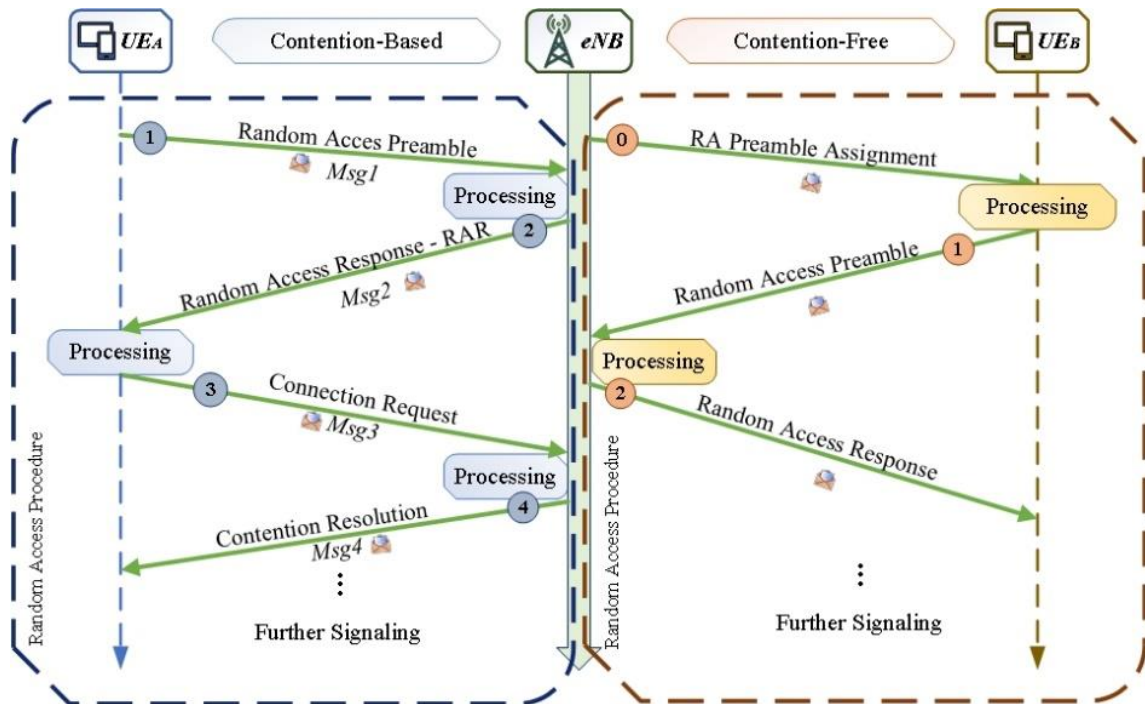
**Ilustración 5.** Arquitectura general de la red LTE-A.

**Fuente:** Autor

Para acceder a la información del perfil de los usuarios almacenados en la base de datos HSS, la MME establece comunicación con el HSS y realiza la autenticación de usuarios, gestiona la movilidad, realiza el traspaso de datos, gestiona los portadores EPS y efectúa la señalización de estrato sin acceso (NAS). Por otro lado, el P-GW se encarga de las comunicaciones con las redes IP externas, mientras que la PCRF es responsable de definir las reglas y políticas relacionadas con la calidad de servicio (QoS), la facturación de UEs y el acceso a los recursos de la red. La S-GW se encarga de transmitir los datos entre los eNB y la P-GW. Por último, el AuC está ubicado dentro del HSS y se encarga de asignar el identificador de usuario y la clave compartida precargada [20].

## 2.6 Procedimiento de acceso aleatorio (RAP) – Basado en Contención

El Procedimiento de Acceso Aleatorio (RAP) en las redes LTE-A, representa a un proceso que se utiliza cuando un dispositivo móvil o dispositivo MTC requiere establecer una conexión con una estación base (eNB). El propósito principal de establecer una conexión con un dispositivo MTC o un dispositivo móvil, es que dicha conexión permite a los dispositivos realizar llamadas, transmitir datos o iniciar una sesión de comunicación [5]. Además, el RAP adopta dos formas distintas: el RAP Libre de contención y el RAP basado en contención. En la Ilustración 6 se puede observar los dos métodos que adopta el RAP.

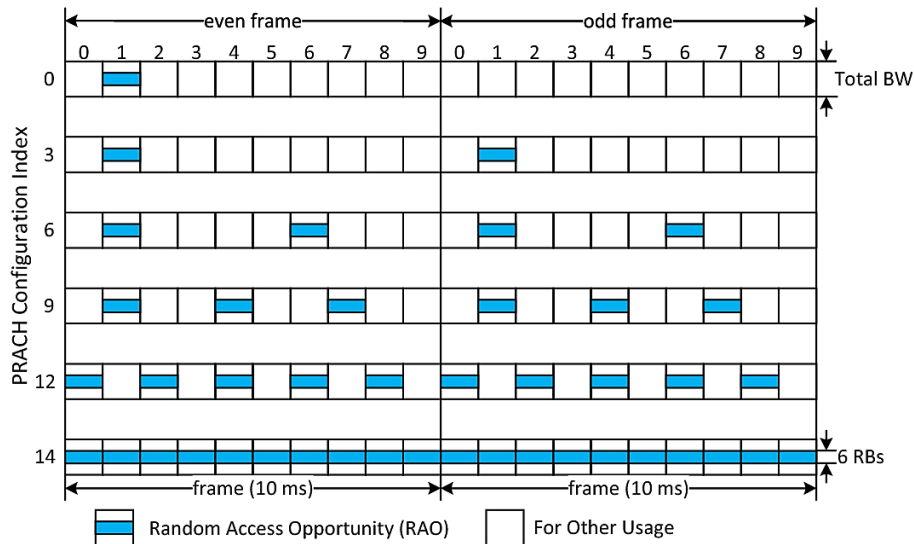


*Ilustración 6. RAP basado en contención VS RAP libre de contención.*

*Fuente: Autor*

EL RAP Libre de contención, es una modalidad que permite la asignación de recursos de acceso específicos a las solicitudes que requieren una alta probabilidad de éxito, como es el caso de situaciones que implican transferencias con restricciones de retraso, es decir, acceso con retraso restringido como es el caso de traspaso. Por otra parte, en el RAP Basado en contención, los dispositivos compiten por el acceso al canal. Sin embargo, debido a la posibilidad de colisiones, este tipo de acceso se reserva para solicitudes de acceso que pueden tolerar ciertos retrasos [21]. Los UEs en el procedimiento de acceso aleatorio en redes LTE-A, pueden realizar intentos de acceso en el dominio del tiempo y frecuencia, además, estos intentos de acceso son conocidos como oportunidades de acceso aleatorio (RAO). Para este proceso, se utilizan dos canales de enlace ascendente: El primero es el canal físico de acceso aleatorio (PRACH) y sirve para transmitir preámbulos, el segundo es el canal físico compartido de enlace ascendente (PUSCH) y se utiliza para transmitir datos [22].

El PRACH se utiliza para indicar la solicitud de conexión cuando un UE intenta establecer conexión con la red celular. En el dominio de la frecuencia, el PRACH está concebido para ocupar el mismo ancho de banda que seis bloques de recursos de transmisión de enlace ascendente convencionales ( $6 \times 180$  kHz). Esta característica facilita la coordinación en la transmisión de enlace ascendente estándar y optimiza la implementación eficiente de los RAO[5].



**Ilustración 7.** Ejemplos de seis configuraciones de PRACH que son determinadas por *prach-ConfigIndex*.

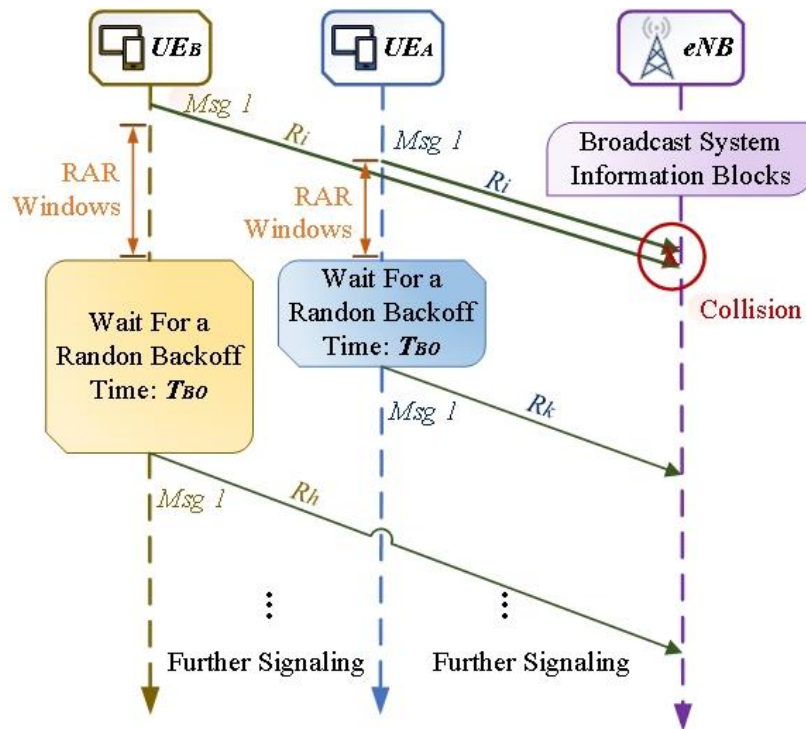
**Fuente:**[23]

En el dominio del tiempo, la periodicidad de los RAO se define mediante el parámetro *Prach-ConfigIndex* que es proporcionado por el eNB. Como se indica en la Ilustración 7, existen 64 configuraciones PRACH disponibles, lo que implica que la periodicidad de los RAO puede variar desde un periodo mínimo de 1 RAO cada 2 tramas hasta un periodo máximo de 1 RAO cada subtrama, dicho de otra manera, desde 1 RAO cada  $20\text{ ms}$  hasta 1 RAO cada  $1\text{ ms}$ . Además, el PRACH incluye un preámbulo (firma) que se utiliza al iniciar la conexión a la red. Por último, Cada celda también tiene la capacidad de gestionar hasta 64 preámbulos ortogonales disponibles [22].

### 2.6.1 Transmisión del Preámbulo (Msg1)

EL primer paso del RAP basado en contención en redes LTE-A, es cuando un UE envía un preámbulo (Ilustración 6) a través del PRACH. El preámbulo mencionado, es seleccionado aleatoriamente y proviene de una lista difundida por la eNB que se encuentra en el Bloque de Información del Sistema (SIB). Luego el UE espera una ventana de tiempo para recibir una respuesta por parte de la eNB (Msg2). La duración de la ventana tiempo es predefinida por la eNB y su tiempo máximo es de 10 milisegundos [24]. En caso de que expire el temporizador y el UE no haya recibido ninguna respuesta, el UE realizará un nuevo intento de acceso. Este acceso ocurrirá cuando el número de intentos sea menor al valor del *preambleTransMax* [24], dado que dicha condición, establece el máximo número de intentos permitidos.

También es importante señalar que existen 64 preámbulos disponibles para el RAP. Sin embargo, no todos los preámbulos están destinados al RAP basado en contención, algunos preámbulos están reservados para el RAP libre de contención.



**Ilustración 8.** Colisión en la transmisión del *Msg1*.

**Fuente:** Autor

Por último, cabe mencionar que cuando varios UEs transmiten el mismo preámbulo en la misma ranura del RAP, se producirá una colisión [25] como se indica en la Ilustración 8. Asimismo, la transmisión de un preámbulo puede fallar cuando un UE se encuentra demasiado lejos del eNB, dicho de otra forma, la potencia de transmisión del UE es insuficiente para acceder a la eNB [5].

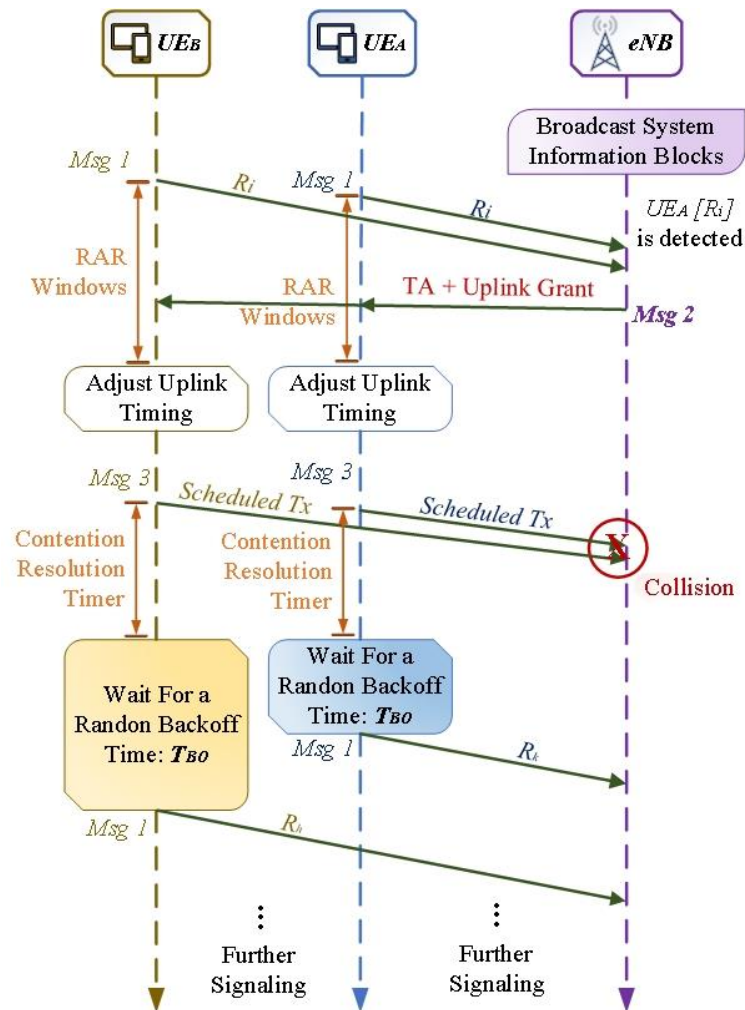
### 2.6.2 Respuesta de Acceso Aleatorio (Msg2)

Cuando la eNB recibe el *Msg1* del UE, procede a emitir un mensaje (*Msg2*) de Respuesta de Acceso Aleatorio (RAR) a través del canal físico compartido de enlace descendente (PDSCH) [24]. Este mensaje incluye la identificación del preámbulo encontrado (ID), la alineación temporal (TA), el indicador de retroceso (*Backoff*, BI) y las asignaciones de recursos de enlace ascendente (recursos PUSCH) destinadas a la transmisión del *MSG3* [5]. Después de completar la transmisión del preámbulo, el UE espera una ventana de tiempo denominada Ventana RAR (WRAR). Esta ventana le permite al UE recibir una asignación de recursos de enlace ascendente por parte de la eNB. Cada asignación de enlace ascendente se encuentra vinculada a un preámbulo que ha sido decodificado correctamente. Además, la longitud del WRAR (subtramas) es transmitida por la estación base a través del SIB2. Como resultado, existe un límite para las concesiones de enlace ascendente que pueden transmitirse dentro de la ventana WRAR [22].

Por otra parte, solo los UE que reciban una asignación de enlace ascendente tendrán la capacidad de transmitir el Mensaje 3 (Msg3). Sin embargo, en situaciones donde la eNB no pueda decodificar los preámbulos transmitidos por múltiples UEs, dichos UEs no obtendrán asignaciones de enlace ascendente y serán catalogados como UEs no exitosos (fallidos) [5].

### 2.6.3 Solicitud de Conexión (Msg3)

Después de obtener el RAR correspondiente, los UEs ajustan su tiempo de transmisión de enlace ascendente conforme al TA recibido, luego transmitirá un mensaje (Msg3) programado al eNB utilizando los recursos PUSCH reservados [24].



**Ilustración 9.** Colisión en la transmisión del Msg3.

**Fuente:** Autor

Además, para resguardar la transmisión del mensaje (Msg3), se emplea el mecanismo de solicitud de repetición automática híbrida (HARQ). Sin embargo, existen situaciones donde múltiples UEs transmiten su preámbulo al mismo tiempo, y a su vez, la eNB logra decodificar exitosamente dichos preámbulos. En estos casos los UEs enviarán su Msg3 utilizando los mismos recursos físicos. Como consecuencia, se producirá una colisión en este punto (Ilustración 9) y además la eNB no podrá decodificar los mensajes transmitidos [5].

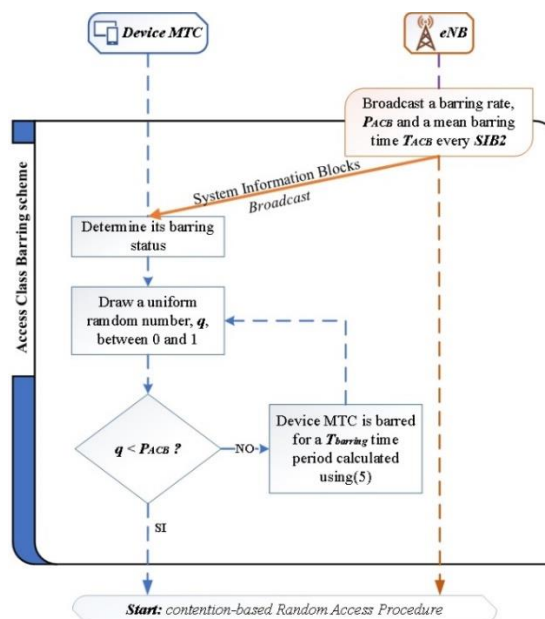


## 2.6.4 Resolución de Contienda (Msg4)

La resolución de contienda se encarga de transmitir un mensaje (Msg4) a través de la eNB como respuesta al mensaje Msg3 enviado por el UE. En este proceso, la eNB implementa un mecanismo denominado HARQ que permite retransmitir el Msg4, en caso de que sea necesario. Por otra parte, en caso de que un UE no reciba el mensaje 4 dentro del límite de tiempo de resolución de contienda, se considera que ha ocurrido una falla en este proceso [24]. Es importante señalar que una falla en el acceso puede deberse a diversos factores, como la insuficiencia de potencia en la transmisión, colisiones entre mensajes, o el vencimiento del temporizador de resolución de contienda. Ante algunas de estas fallas mencionadas, algunos UEs incrementan su potencia de transmisión y seguidamente retransmiten un preámbulo nuevo que es seleccionado aleatoriamente en un nuevo RAO, basado en un esquema de retroceso uniforme que utiliza la información proporcionada por el BI. Cabe destacar que cada UE mantiene un registro de sus transmisiones de preámbulo. Cuando el UE ha transmitido una cierta cantidad de preámbulos sin éxito, conocido como *preámbuloTransMax* (informado previamente por el eNB a través de un SIB), dicho UE concluirá que la red no se encuentra disponible para él. En esta situación, se notifica a las capas superiores la existencia de un inconveniente en el acceso aleatorio, y a su vez, se da por finalizado el RAP basado en contención [5].

## 2.7 Restricción de clase de acceso – ACB

Para resolver el problema de sobrecarga en el PRACH, el estándar 3GPP ha implementado en las especificaciones de LTE, un esquema de control de congestión denominado restricción de acceso por clase (*Access Class Barring*, ACB). Cuando los UEs están a punto de solicitar acceso al PRACH, el esquema de control de congestión ACB, obliga a todos los UEs a realizarse una verificación probabilística, esta verificación también es conocida como la probabilidad de bloqueo ( $P_{ACB}$ ) y se encuentra bajo el control de la eNB [26].



**Ilustración 10.** Esquema de restricción de clase de acceso (ACB).

**Fuente:** Autor

Luego, los UEs que pasen satisfactoriamente la verificación, podrán continuar. Por otra parte, los UEs que no logren pasar la verificación, estarán bloqueados por un periodo aleatorio, cuya duración estará asignada por un tiempo de bloque ( $T_{ACB}$ ) que se encuentra bajo el control de la eNB. De esta forma, cuando existan múltiples UEs que intenten acceder a la eNB de forma simultánea, el mecanismo ACB reformara el patrón de acceso de manera sincronizada, evitando así, sobrecargas en el PRACH [26]. De esta manera, ACB distribuye los accesos de los dispositivos móviles a lo largo del tiempo, lo cual resulta efectivo en situaciones de congestión moderada y cuando existen periodos cortos, generalmente si son de pocos segundos [5].

### 2.7.1 Probabilidad de Bloqueo ( $P_{ACB}$ )

La probabilidad de bloqueo ( $P_{ACB}$ ) del esquema ACB, indica la proporción de intentos de acceso que son bloqueados debido a la clase de acceso (AC), por lo tanto, la  $P_{ACB}$  se considera como un parámetro (Tabla 1) importante que permite medir la efectividad de las restricciones de AC, garantizando así la calidad de servicio [27].

**Tabla 1.** Consideraciones de la  $P_{ACB}$

*Fuente:* Autor

$P_{ACB}$	INTERPRETACIÓN
Alto	Indica que el operador de la red está aplicando restricciones demasiadas estrictas, lo que puede afectar negativamente a la experiencia de los UE.
Bajo	Indica que el operador de la red no está aplicando restricciones de ACB de manera efectiva, esto no podría garantizar la calidad del servicio de los UE.

### 2.7.2 Tiempo de Bloqueo ( $T_{ACB}$ )

El tiempo de bloqueo ( $T_{ACB}$ ) es un parámetro del esquema de control de congestión ACB y se define como el periodo en que un UE se bloquea para acceder a la red móvil terrestre pública (PLMN). Por lo tanto, si se aplica el esquema ACB, los diferentes UE se bloquearán temporalmente para poder acceder a la red [27]. Este periodo puede variar en unos pocos segundos o minutos según la configuración (Tabla 2) establecida en la red.

**Tabla 2.** Consideraciones de  $T_{ACB}$

*Fuente:* Autor

$T_{ACB}$	INTERPRETACIÓN
Alto	Indica que los UE bloqueados deben esperar más tiempo antes de volver a intentar acceder. Esto puede garantizar que solo un número limitado de UEs acceda al canal PRACH, lo que evita la congestión y la sobrecarga del canal.
Bajo	Indica que los UE bloqueados deben esperar menos tiempo antes de volver a intentar acceder. Esto puede aumentar el riesgo de congestión en el canal PRACH cuando muchos dispositivos intentan acceder simultáneamente. Esto puede llevar a colisiones y retrasos adicionales.

### 2.7.3 Clases De Acceso Definidas por el estándar 3GPP

Las clases de acceso (AC) definidas por el estándar 3GPP son 16 poblaciones móviles que pueden ser asignadas a cada UE. Estas poblaciones móviles se dividen en tres secciones distintas. La primera sección se refiere al AC para los UE normales, que se distribuyen en AC del 0 al 9. La siguiente sección es el AC 10, que se reserva para el acceso a la red de llamadas de emergencia. Finalmente, la sección AC 11-15, se asigna a los UE de mayor prioridad. Considerando esta clasificación de AC, el operador de la red puede limitar el acceso de ciertos UE a áreas específicas de una red móvil terrestre [28]. A continuación, en la Tabla 3 se puede detallar las clases de acceso definidas por el estándar 3GPP.

**Tabla 3.** Clases De Acceso Definidas por el estándar 3GPP

*Fuente:* Autor

NÚMEROS DE CLASE DE ACCESO	DISPOSITIVOS M2M/MTC
0 - 9	Acceso a la red para UE Normales
10	Acceso a la red para llamadas de emergencia
11 - 15	Acceso a la red para UE de Mayor Prioridad

Cuando se implementa el esquema de control de congestión ACB, el  $T_{ACB}$  suele variar desde los 4 segundos hasta los 512 segundos, y la  $P_{ACB}$  varía desde los 0.05 hasta los 0.95. Estos parámetros del ACB se aplican a las CA 0–9. Luego, al inicio del RAP, los UEs determinan su estado de restricción según la información que le proporciona la eNB. Para lo cual, los UEs generarán un número aleatorio en el rango de 0 y 1  $\mu[0,1]$ , y si el número es menor o igual a la  $P_{ACB}$  [29], los UEs transmitirán su preámbulo, de lo contrario, esperan un tiempo aleatorio calculado de la siguiente manera:

$$T_{barring} = [0.7 + 0.6 \times \mu[0,1]] \times T_{ACB} \quad (1)$$

Por último, es importante mencionar que el esquema de control de congestión ACB sólo es útil para aliviar períodos esporádicos de congestión [5]. Esto significa que el esquema ACB se limita cuando existe múltiples UEs que intentan transmitir a la eNB simultáneamente.



### **3. CAPÍTULO III. METODOLOGIA.**

#### **3.1 Tipo y Diseño de la investigación**

##### **3.1.1 Investigación Exploratoria**

En el presente proyecto de investigación, se recopila información proveniente de estudios científicos relacionados con el RAP basado en contención en escenarios IoT, que faciliten comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC), y a su vez, apliquen un esquema de restricción (ACB) como una técnica de control de congestión que permita mitigar las colisiones que se generan en el RACH, cuando diferentes dispositivos MTC intentan acceder simultáneamente a las estaciones base. Además, se explora el impacto que genera la variación de los parámetros ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) del esquema de restricción ACB en el RACH, teniendo en cuenta las diferentes demandas de tráfico (Dispositivos: HTC y MTC) que define el estándar 3GPP y también las diferentes métricas ( $D$ ,  $P_5$ ) que permiten evaluar el desempeño y el rendimiento de la red cuando se implementa el control de congestión ACB.

#### **3.2 Métodos y técnicas de investigación**

##### **3.2.1 Método Científico**

El método científico tiene como propósito establecer relaciones entre distintos hechos con el fin de derivar un criterio verificable y esencial respecto al tema de investigación. Por lo tanto, en este proyecto, se podrán establecer criterios fundamentados en un modelo analítico, al mismo tiempo que se determinarán métodos de aproximación que faciliten la evaluación del impacto que se genera al variar los parámetros ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) del esquema de control de congestión ACB en el RACH. Este análisis se llevará a cabo en diversos escenarios recomendados por el estándar 3GPP, donde se evaluarán los resultados obtenidos, incluyendo la medición de las métricas de rendimiento.

##### **3.2.2 Técnica de Recolección de Datos**

La técnica de observación consiste en observar y evaluar cuidadosamente a un fenómeno en particular, de modo que su información relevante será analizada de manera precisa y sistemática con el fin de registrar alguna situación que ocurra con el fenómeno con respecto a los objetivos del presente proyecto investigación. Para esta investigación los parámetros considerados para la técnica de observación son: el número de UEs MTC que acceden exitosamente a la red cuando son procesados por el RAP basado en contención que tiene como control de congestión al esquema ACB, además, el número promedio de transmisiones de preámbulo y el retardo en el acceso generado después de completar satisfactoriamente el RAP basado en el percentil 95 ( $D_{95}$ ) que se ubica cerca del retardo máximo generado.

### 3.2.3 Instrumentos de Recolección de Datos

A continuación, en la Tabla 4 se detallan los instrumentos que se emplearán en el desarrollo del presente proyecto de investigación.

**Tabla 4.** Instrumentos para la Recolección de Datos del Proyecto de Investigación

*Fuente:* Autor

INSTRUMENTOS	DESCRIPCIÓN
3GPP TR 37.868	Reporte técnico: Estudio sobre las mejoras en el RAN para dispositivos MTC.
3GPP TS 36.321	Reporte técnico: Detalles acerca del protocolo de Control de Acceso al Medio.
3GPP TS 36.211	Reporte técnico: Detalles acerca de los Canales Físicos y Modulaciones
Artículos Científicos	Esquema de control de congestión ACB como técnica de control, cuando se generan colisiones en el RACH.
Artículos Científicos	Rendimiento del RACH en escenarios IoT que admitan comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC)
Software Matlab	Software para la implementación el modelo de simulación propuesto.

### 3.3 Población, Muestra y Métricas de rendimiento

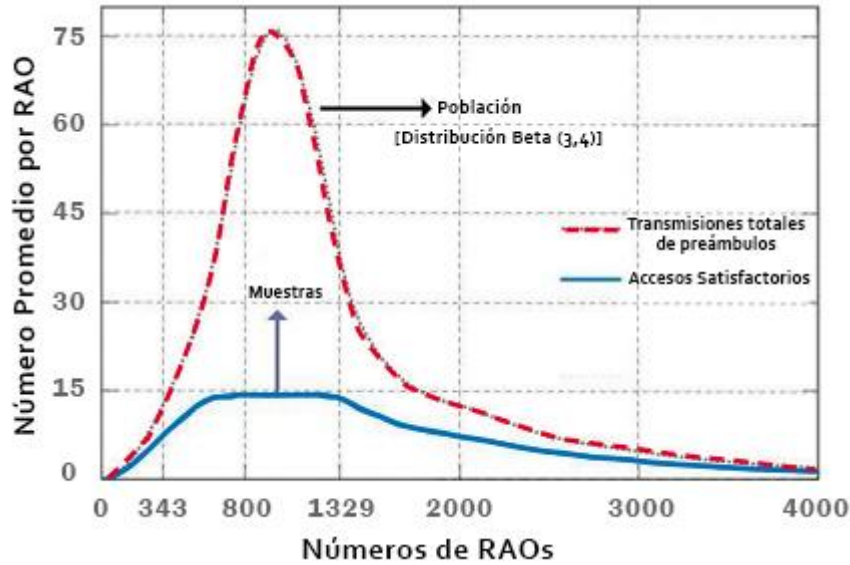
#### 3.3.1 Población

Para el presente proyecto, la población está definida a un modelo de tráfico donde se evalúa el rendimiento de la red y se considera diferentes intensidades de tráficos (bajo, media y alta). El modelo de tráfico que representa la población del presente proyecto se basa en el segundo modelo de tráfico sugerido por el estándar 3GPP, donde dicho tráfico va dirigido a escenarios extremos, donde existe un gran número de UEs MTC (mMTC), que siguen una distribución *Beta* ( $a = 3, b = 4$ ) para los diferentes tiempos de llegada [5]. La elección de este modelo de tráfico se fundamenta en la necesidad de simular escenarios de alta densidad donde múltiples dispositivos MTC intentan acceder a la eNB de manera simultánea. Además, esta población permite evaluar el rendimiento de la red en situaciones que demanden cargas altas de tráfico. También, la distribución Beta aplicada a los tiempos de llegada contribuye a capturar de manera precisa la variabilidad de estos dispositivos, lo que resulta esencial para el estudio del rendimiento de la red LTE-A.

#### 3.3.2 Muestra

La muestra se determinará en base al número de UEs MTC que han logrado culminar con éxito el procedimiento de acceso aleatorio en el modelo de tráfico 2 definido por el estándar 3GPP. En la Ilustración 11, se puede observar cómo se reparte la población (línea discontinua), y a su vez, como se define la muestra (línea continua). Mediante esta muestra se evaluará las diferentes métricas de rendimiento de una red ( $D, P_S$ ) en torno a la variación

de los parámetros ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) del esquema de restricción ACB considerando distintos escenarios de tráfico masivo mMTC en las comunicaciones IoT.



**Ilustración 11.** Población determinada a través de la distribución Beta ( $\alpha = 3, \beta = 4$ ) y la muestra establecida por los UEs MTC que alcanzaron un acceso satisfactorio.

**Fuente:** Autor

### 3.3.3 Métricas de rendimiento

- **Probabilidad de acceso satisfactorio - ( $P_S$ )**

La Probabilidad de Acceso Satisfactorio ( $P_S$ ) se define como la relación que existe entre el número total de UEs MTC que realizan el RAP basado en contención satisfactoriamente y el número total de UEs MTC que ingresan a la eNB en ese mismo período [5]. A continuación, la Ecuación 2 representa matemáticamente a la  $P_S$ .

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

**Ecuación 2.** Probabilidad de Acceso satisfactorio ( $P_S$ ).

**Fuente:** [5]

Donde:

$n_A$ : N° total de UEs MTC que acceden a la eNB con acceso satisfactorio.

$n_T$ : N° total de UEs MTC que acceden a la eNB

La cuantificación de la  $P_S$  se vuelve una herramienta esencial para la evaluación del rendimiento de la red LTE-A. La obtención de una  $P_S$  mayor al 95%, implica la optimización de parámetros clave como la configuración de los parámetros ACB, incluyendo la configuración del RACH y la distribución de recursos a la red. Esta métrica de rendimiento se calcula en diferentes intervalos tiempo, lo que permite una adaptación dinámica a las necesidades de conectividad de los UEs MTC y garantiza un acceso eficiente y confiable a la red LTE-A [12].

- **Retardo de acceso - ( $D$ )**

El retardo de acceso se refiere al lapso entre el primer intento de acceso (ya sea mediante la transmisión de preámbulo o la verificación del esquema ACB) y la conclusión exitosa del procedimiento de acceso aleatorio. En consecuencia, este retardo constituye la suma de todos los tiempos de demora que se generan en las diversas etapas del proceso [5].

### 3.4 Operacionalización de las variables

*Tabla 5. Operacionalización de variables del presente Proyecto de Investigación.*

*Fuente: Autor*

VARIABLE INDEPENDIENTE	CONCEPTO	INDICADORES	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
Esquema de control de congestión ACB	Es un esquema de control de congestión diseñado para limitar el número de intentos de acceso simultáneos desde ciertos UE según sus características de tráfico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tasa de Bloqueo: <math>P_{ACB}</math></li> <li>• Tiempo de Bloqueo: <math>T_{ACB}</math></li> </ul>	Observación del modelo de simulación desarrollado del procedimiento de acceso aleatorio basado en contención aplicando la técnica de control de congestión ACB (Matlab).
VARIABLE DEPENDIENTE	CONCEPTO	INDICADORES	
Rendimiento de la red LTE-A	Es la cantidad de UE que han accedido satisfactoriamente a la red LTE-A con un retardo considerablemente.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Retardo en el acceso (<math>D</math>) basado en el percentil 95</li> <li>• Probabilidad de acceso satisfactorio (<math>P_s</math>)</li> </ul>	

### 3.5 Procedimiento y Análisis.

Para evaluar el impacto del bloqueo de acceso por clase (ACB) en el retardo de las comunicaciones IoT en escenarios de alto tráfico, se lleva a cabo un modelo de simulación en el software de Matlab, donde se incorpora el esquema ACB al RAP basado en contención. El modelo de simulación fue diseñado para representar escenarios realistas de las redes LTE-A, que operan en situaciones de alto tráfico generado por dispositivos MTC y HTC en entornos de tecnología IoT. También, en la simulación se estableció diferentes escenarios de prueba, como cambiar la densidad de dispositivos MTC, variar los parámetros del RACH y ajustar los parámetros ACB. A continuación, se presente el procedimiento que se llevará a cabo en el presente proyecto de investigación.

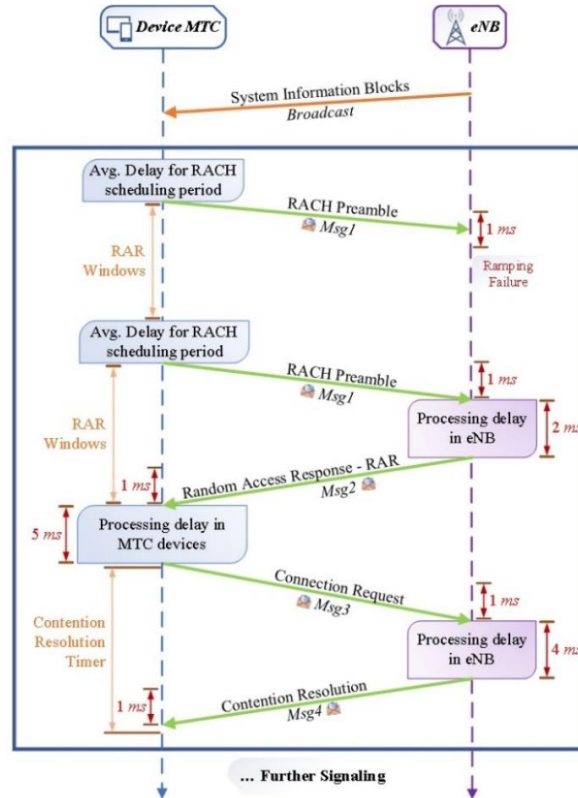
1. En primer lugar, se inicia con la revisión sistemática de los fundamentos enfocados al RAP basado en contención, comunicaciones mMTC, comunicaciones IoT y el esquema ACB como un mecanismo de control de congestión para el RACH.
2. Luego, para realizar el análisis y la evaluación del comportamiento del RAP basado en contención mediante los indicadores KPI ( $P_S$ ,  $D_{95}$ ), se diseña un modelo analítico y configurable que integre la configuración de los parámetros del RACH y los parámetros del esquema ACB ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ).
3. Después de haber diseñado el modelo analítico, se procede a desarrollar el script en el software de Matlab donde se implementa el modelo diseñado. En este Script primero se establece los parámetros iniciales del RACH, de acuerdo con los datos especificados en la Tabla 7.
4. Ahora, para ejecutar las primeras simulaciones, se debe configurar el escenario con una periodicidad inicial de  $T_{RAO}$  igual a 1 ms, además, se debe establecer un tráfico inicial de 5000 UEs MTC. También, los parámetros ACB deben configurarse con una  $P_{ACB}$  de {0.1, 0.3, 0.5, 0.9} y un  $T_{ACB}$  de {1, 2, 3, 4, 5, 8, 16} s. Estas configuraciones permitirán encontrar los resultados de la  $P_S$  y  $D_{95}$ .
5. Cuando haya finalizado la simulación, el Script desarrollado almacenara y organizara los resultados en una hoja de Excel. En estos resultados almacenados, se procesarán solo los valores de PS que superen el 95% de probabilidad.
6. Ahora, para obtener los resultados de la  $P_S$  en base a los diferentes tráficos propuestos, se debe repetir los pasos cuatro y cinco. Para esta simulación se debe mantener la misma periodicidad de  $T_{RAO}$  de 1 ms y los mismos parámetros del esquema ACB. Esta simulación nos brindara resultados enfocados a la cantidad de UEs MTC que intentan acceder a la eNB.
7. De igual forma, para obtener los resultados de la  $P_S$  en base a las diferentes periodicidades propuestas, se debe repetir los pasos cuatro, cinco y seis. Para esta simulación se debe variar periodicidad de  $T_{RAO}$  a 5 ms y se debe considerar los mismos parámetros del esquema ACB. Esta simulación nos brindara resultados enfocados la periodicidad.

8. Finalmente, con los resultados obtenidos se determina los parámetros óptimos del esquema ACB para proporcionar comunicaciones fiables, identificando qué valor de periodicidad brinda mejores resultados. La fiabilidad del sistema la modelamos configurando una probabilidad de acceso satisfactorio  $PS \geq 0.95$ , considerando comunicaciones IoT tolerantes al retardo.

Este procedimiento mencionado, proporciona una evaluación detallada del rendimiento del RAP basado en contención y ayuda a identificar las configuraciones óptimas de los parámetros ACB. A continuación, se describe los procedimientos y consideraciones para el presente proyecto de Investigación.

### 3.5.1 Caracterización del Procedimiento de Acceso Aleatorio.

Para la elaboración del modelo de simulación en Matlab, se ha considerado el RAP para redes LTE-A. Además, es importante mencionar que existen dos modelos de RAP, el modelo basado en contención y el modelo libre de contención. El RAP libre de contención, evita las colisiones mediante la asignación sincronizada de los preámbulos por parte de la eNB en intervalos definidos y UEs MTC específicos. En cambio, en el RAP basado en contención, los UEs eligen los preámbulos de forma aleatoria. Esta elección aleatoria genera un riesgo de colisión en la eNB, es decir, los UEs podrían optar por la misma firma de preámbulo en el mismo intervalo de RAO. Por tanto, el modelo basado en contención requiere un mecanismo de resolución de conflictos.



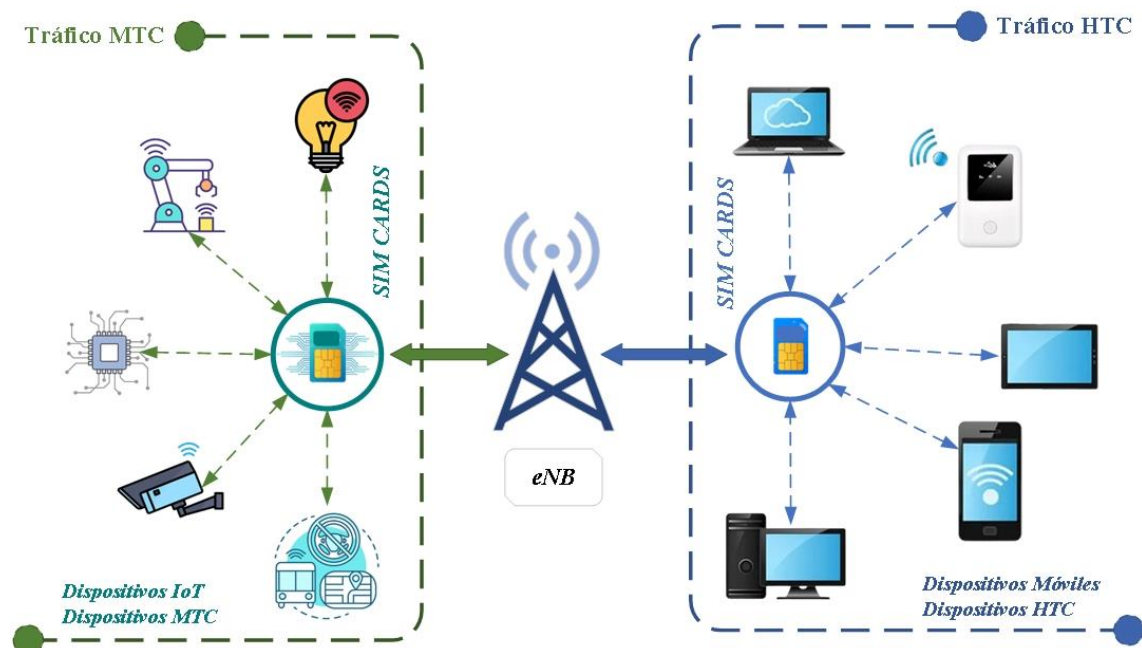
*Ilustración 12. RAP basado en contención para redes LTE-A.*

*Fuente: Autor*

Considerando las características de los dos modelos de RAP antes mencionados, se ha optado implementar el RAP basado en contención (Ilustración 12). La elección de este modelo se fundamenta en la necesidad de analizar el rendimiento de la red LTE-A en escenarios de tráfico masivo, donde la densidad de los UEs MTC es alta y las colisiones en la eNB son críticas. Además, el modelo de RAP basado en contención se considera el más apropiado para evaluar la probabilidad de acceso satisfactorio, ajustar los parámetros ACB y analizar el impacto que causa el esquema ACB en el retardo de las comunicaciones IoT en escenarios de alto tráfico.

### 3.5.2 Modelo y Caracterización del Escenario

El escenario del presente proyecto de investigación consta de una eNB que brinda servicio a una gran cantidad de UEs MTC y HTC. Estos dispositivos incorporan una tarjeta SIM que les permite tener una conexión directa con la eNB, es decir, los UEs MTC y HTC, no tendrán la necesidad de utilizar una puerta de enlace (Gateway) adicional para conectarse a la eNB. A continuación, en la Ilustración 13, se puede visualizar el escenario propuesto para el presente proyecto.



*Ilustración 13. Modelo del escenario del presente proyecto.*

*Fuente: Autor*

Este escenario de red está enfocado a la gestión de UEs MTC que intentan acceder simultáneamente a la eNB. Además, la utilización de tarjetas SIM incorporadas en los UEs MTC y HTC, simplifica el proceso de autenticación, y su vez, conlleva a tener consideraciones de seguridad que se debe tener en cuenta en el diseño de la red.

### 3.5.3 Configuración y Evaluación del Canal

Para evaluar el RACH, se debe considerar la comparación de nuevos esquemas de control de congestión. Por lo cual, la evaluación del RACH se convierte en una tarea complicada debido a la gran cantidad de parámetros y escenarios de prueba que deben ser considerados

en una evaluación. Por tal razón, el estándar 3GPP TR 37.868 ha establecido dos modelos de tráfico y dos indicadores clave de rendimiento (KPI) [29], que son considerados para evaluar la eficiencia del RAP en las redes LTE-A en el ámbito de las comunicaciones mMTC.

### 3.5.4 Designación de los Tráficos MTC y HTC

- **Tráfico MTC**

El estándar 3GPP ha definido dos modelos de tráfico (1 y 2) teniendo en cuenta las siguientes características: El primer modelo de tráfico está considerado para escenarios típicos donde las llegadas de los UEs MTC se distribuyen en un periodo de manera uniforme, es decir, que los dispositivos se reparten de forma no sincronizada. El segundo modelo de tráfico va dirigido a escenarios extremos, donde existe un gran número de UEs MTC (mMTC), que siguen una distribución *Beta* ( $a = 3, b = 4$ ) para los diferentes tiempos de llegada [5]; además, estos dispositivos intentan acceder a la eNB de manera altamente sincronizada en respuesta a un evento que produce que los dispositivos quieran conectarse simultáneamente a la red.

**Tabla 6.** Modelos de tráfico propuestos por el estándar 3GPP para dispositivos MTC

*Fuente:* [29]

CARACTERÍSTICAS	TRÁFICO 1	TRÁFICO 2
Nº de UEs MTC	1000, 3000, 5000, 10000, 30000	1000, 3000, 5000, 10000, 30000
Distribución de llegada	Distribución uniforme sobre T	Distribución beta ( $\alpha = 3, \beta = 4$ ) sobre T
Período de distribución (T)	60 segundos	10 segundos

Por lo tanto, se determina que el modelo de tráfico 2 (Tabla 4) definido por el estándar 3GPP, será el tráfico de referencia para el presente proyecto de investigación.

- **Tráfico de fondo HTC**

Con el objetivo de determinar el modelo de tráfico de fondo HTC, se han tomado como punto de partida los estudios [5] y [27], los cuales manifiestan que el modelo tráfico HTC presenta una distribución uniforme a lo largo del tiempo. Este modelo de tráfico se fundamenta en la información del registro de detalles de llamadas (CDR), entregada por la empresa de telecomunicaciones: Telecom Italia. Por otra parte, el estudio [30], indica que una eNB puede gestionar 55 configuraciones de portador de acceso de radio EPS por segundo cuando se registra una carga considerablemente alta. Para el presente proyecto, utilizaremos estos datos mencionados como referencia para normalizar los resultados de los estudios [5] y [27]. Además, para mantener la fidelidad de los datos, evitamos la interpolación, a pesar de que el tráfico se obtiene cada de 10 minutos. Por consiguiente, asumimos que el valor del tráfico procesado se mantiene constante en periodos de 10 minutos. Esto implica que, durante los momentos de mayor tráfico, las tasas de llegada de los UEs HTC, serán de 55 por segundo durante 10 minutos.



### 3.5.5 Configuración del PRACH

En la simulación propuesta se considera una configuración típica del PRACH [31], el cual establece un índice de configuración *prach-ConfigIndex* igual a 6. En esta configuración, el tamaño de la subtrama es de 1 ms y la periodicidad de los RAO son iguales a 1 ms y 5ms. También se emplean un total de preámbulos igual a  $R = 54$  de los 64 preámbulos disponibles para el RAP basado en contención, además, se ha fijado el número máximo de transmisiones de preámbulo por cada UE MTC en *preámbuloTransMax* igual a 10. A continuación, en la Tabla 7, se describen los parámetros empleados en la simulación propuesta.

**Tabla 7.** Establecimiento de los parámetros del canal de acceso aleatorio.

*Fuente:* Autor

Parámetros	Configuración
Configuración del Índice del PRACH	<i>prachConfigIndex</i> = 6
Longitud de Subtrama	<i>Subframe length</i> = 1 ms
Preámbulos disponibles para sistemas basados en contención	$R = 54$
Periodicidad del RAOs	$T_{RAO} = 1ms, 5 ms$
Nº máx. de concesiones de enlace ascendente por subtrama	$N_{RAR} = 3$
Nº máx. de transmisiones de preámbulo ( <i>preámbuloTransMax</i> )	$k_{Max} = 10$
Indicador de Backoff	$\beta I = 20 ms$
Número máx. de transmisiones del Msg3 y Msg4	5
Probabilidad de retransmisión HARQ para Msg3 y Msg4	0.1
Tamaño de ventana de RAR	$W_{RAR} = 5 Subtramas$
Retraso en el procesamiento del preámbulo	2 Subtramas
Retraso en el procesamiento de la solicitud de conexión	4 Subtramas
Tiempo de ida/vuelta (RTT) del Msg3	8 Subtramas
Tiempo de ida/vuelta (RTT) del Msg4	5 Subtramas
Temporizador de resolución de conflictos	48 Subtramas

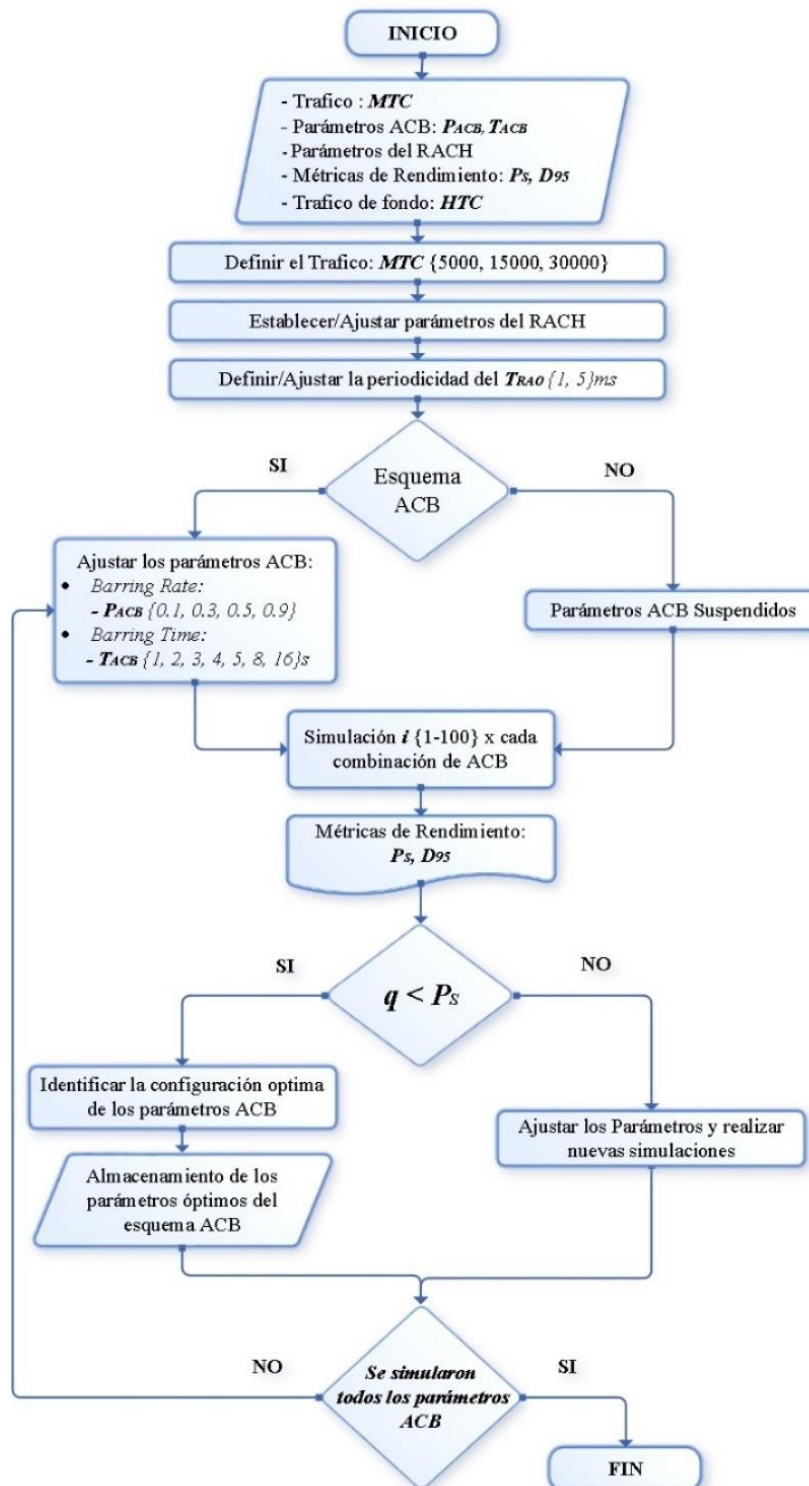
### 3.5.6 Indicadores clave de rendimiento – KPIs

Para evaluar el efecto que causa el esquema de control de congestión ACB en el retardo de las comunicaciones IoT en condiciones de alto tráfico, utilizaremos dos KPIs (*key performance indicators*). Estos indicadores facilitan la comparación del rendimiento y la capacidad del RACH en la red LTE-A [30]. A continuación, se presentan los dos KPIs fundamentales para evaluar la capacidad RACH en esta investigación.

- KPI 1: Probabilidad de acceso satisfactorio ( $P_s$ ), y es definida como la fracción de UE que termina en completar con éxito el RAP basado en contención.
- KPI 2: Estadísticas del retardo de acceso, Que denota el tiempo entre el primer intento de acceso y la culminación exitosa del RAP basado en contención. Para evaluar este KPI, se calcula el percentil 95, denominados  $D_{95}$

También, para obtener estos KPIs, desarrollamos una simulación en el software de Matlab (Ilustración 14) sobre los eventos discretos independientes. En cada simulación, las llegadas

de los dispositivos MTC se distribuyen en T segundos, por lo tanto, el RAP basado en contención descrito anteriormente, se replicará con sus parámetros (Tabla 7) en cada simulación.



**Ilustración 14.** Diagrama de flujo del algoritmo de funcionamiento del Esquema de control de congestión ACB en el RAP basado en contención para redes LTE-A.

**Fuente:** Autor

### 3.5.7 Designación del Modelo de Colisión

Previo a la simulación, se considera la probabilidad de que múltiples UEs MTC transmitan el mismo preámbulo simultáneamente, además, se considera que el RAP basado en contención puede experimentar colisiones, tales como: colisiones en la transmisión del preámbulo (Msg1) y colisiones en la solicitud de conexión (Msg3). Por consiguiente, se ha establecido dos modelos de colisión. El primer modelo se basa únicamente en las colisiones generadas en el Msg1, esta colisión impide a la eNB decodificar múltiples preámbulos a la vez. El segundo modelo considera la decodificación correcta del Msg1, pero en el Msg3, asumirá que se ha generado una colisión. De igual manera, es importante tener en cuenta que, en la práctica es posible que se produzcan ambos tipos de colisiones. Sin embargo, el presente proyecto se enfoca en analizar y comparar el comportamiento del RACH en uno de estos modelos.

**Tabla 8.** Comparación de la  $P_s$ , entre el Modelo de Colisión 1 y 2.

*Fuente:* Autor

UEs	Modelo de Colisión 1	Modelo de Colisión 2
MTC	31.30 %	16.42 %

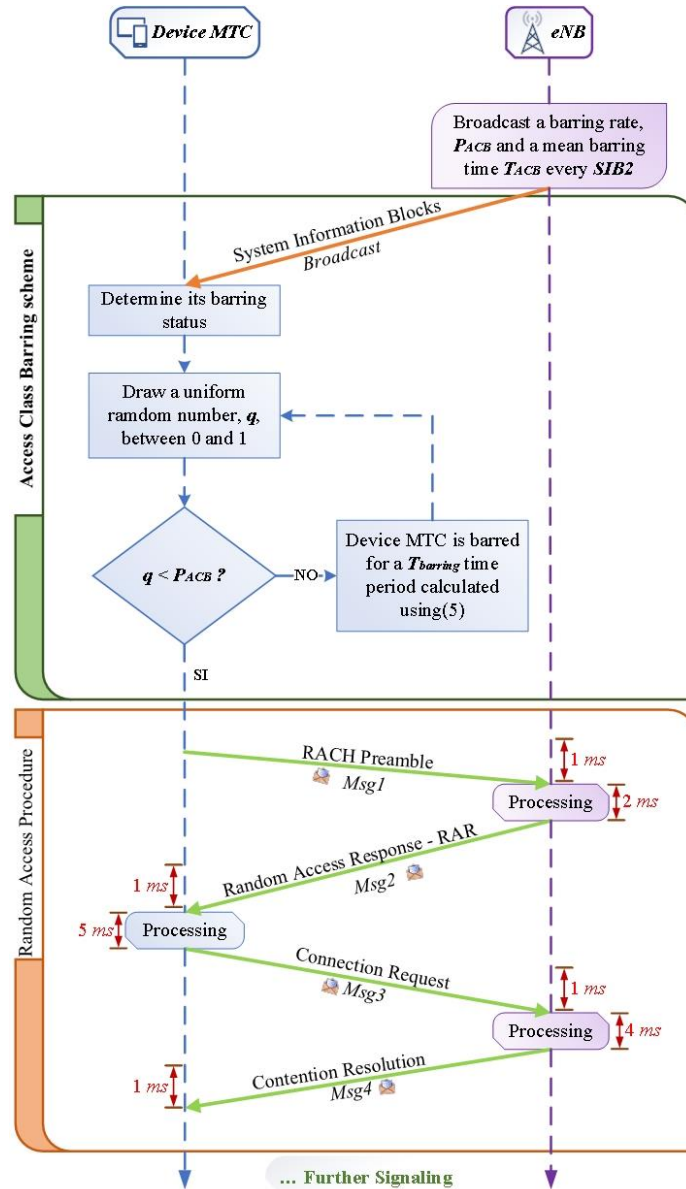
En este caso, para determinar el modelo de colisión que se utilizará, se han realizado simulaciones sobre RAP basado en contención utilizando los dos modelos de colisión (Colisión 1 y 2 con tráfico 2 y  $NM = 30000$  MTC, de la Tabla 6) y la probabilidad de acceso satisfactorio ( $P_s$ ) para UEs MTC. Como se observa en la Tabla 8, el modelo de colisión 2 tiene un  $P_s$  significativamente menor con relación al modelo de colisión 1. Esto sucede porque algunas concesiones de enlace ascendente en el modelo de colisión 2, se envían en respuesta a la transmisión de un preámbulo determinado, causando así, más colisiones en el Msg3. Para el modelo de simulación propuesto, seleccionamos el modelo de colisión 1, considerando las recomendaciones del estándar 3GPP para el análisis del rendimiento de LTE-A. El modelo de colisión 2, no se tomará en cuenta, puesto que distorsionaría el rendimiento del esquema ACB. Por último, Es importante destacar que el rendimiento del RACH será diferente si se utiliza otro modelo de colisión.

### 3.5.8 Implementación del esquema ACB

En el RAP basado en contención, se ha incluido el esquema de control de congestión ACB, esto se realiza con la finalidad de gestionar eficazmente la congestión en el PRACH de la red LTE-A. Además, el esquema ACB incorpora un mecanismo de evaluación probabilística para todos los UEs MTC que deseen acceder al PRACH. Esta evaluación, es conocida como la probabilidad de bloqueo ( $P_{ACB}$ ), y está bajo el control de la eNB que determina cuáles UEs tienen la posibilidad de acceder a la eNB. Los UEs que logren acceder satisfactoriamente a la red, continuarán con el RAP basado en contención.

Por otro lado, los UEs MTC que no logren acceder a la eNB, serán bloqueados temporalmente durante un período aleatorio definido como tiempo de bloqueo ( $T_{ACB}$ ). La

implementación del esquema ACB en el RAP basado en contención, ayudara a evitar sobrecargas en el PRACH.



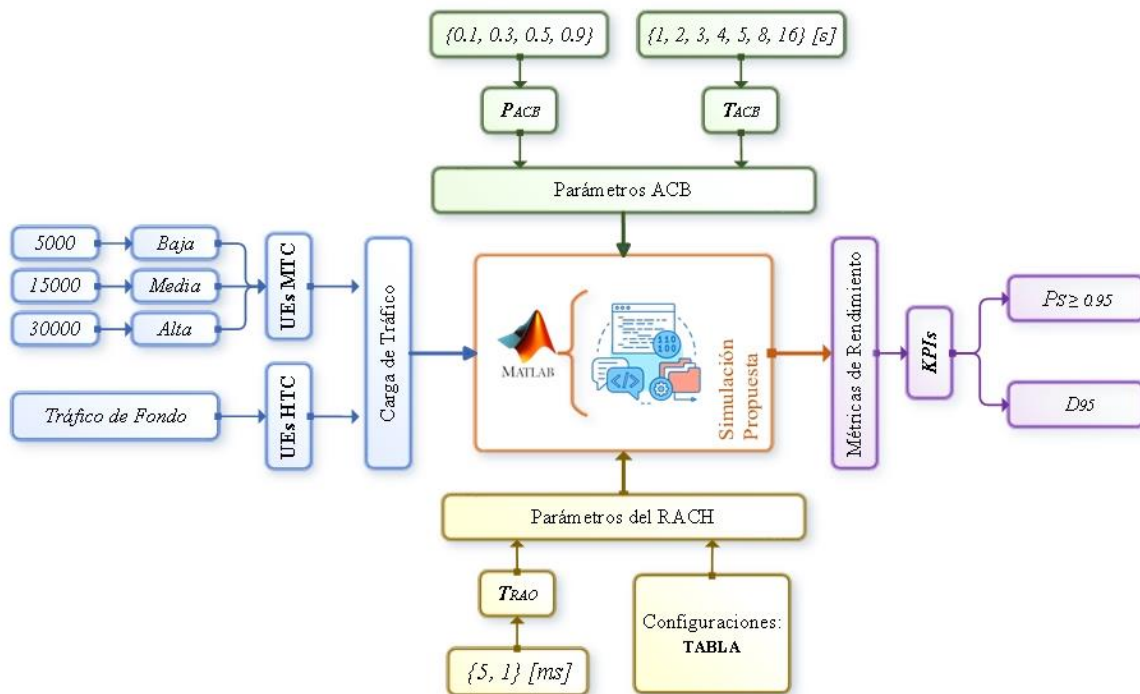
**Ilustración 15.** Esquema de control de congestión ACB en el RAP basado en contención para redes LTE-A.

**Fuente:** Autor

Una vez implementado el esquema ACB en el RAP basado en contención, procedemos a realizar una evaluación exhaustiva sobre el impacto que genera el ajuste de los parámetros ACB ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) con diferentes periodicidades ( $T_{RAO} \{1, 5\}ms$ ). Esta evaluación se enfoca en dos indicadores clave de rendimiento como la  $P_S$  y el  $D_{95}$ . Nuestro meta principal es determinar la configuración óptima de los parámetros ACB, tales como la  $P_{ACB}$  y el  $T_{ACB}$ , que garanticen una  $P_S$  mayor o igual a 0.95. Para llevar a cabo esta evaluación, hemos desarrollado un modelo de simulación en Matlab que permite la configuración de estos parámetros.

#### 4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección, a través de los resultados conseguidos (Ilustración 16), se analizará el impacto que genera el esquema de control de congestión ACB en el retardo de las comunicaciones IoT en escenarios de alto tráfico (mMTC). Además, este análisis se realiza con la finalidad de garantizar la fiabilidad de las comunicaciones IoT dentro de las redes LTE-A. Para el desarrollo del análisis mencionado, se evalúa los resultados obtenidos de la probabilidad de acceso satisfactorio ( $P_S$ ) y el retardo en el acceso ( $D_{95}$ ) de los dispositivos MTC. El enfoque principal de este análisis es identificar las configuraciones óptimas de los parámetros ACB ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) para obtener un  $P_S$  aceptable, es decir, el objetivo principal del presente proyecto consiste en alcanzar un  $P_S \geq 0.95$  para diferentes cargas de tráfico (bajo, medio y alto) de: 5000, 15000 y 30000 dispositivos MTC.



**Ilustración 16.** Variables de entrada y resultados de la simulación propuesta en Matlab.

**Fuente:** Autor

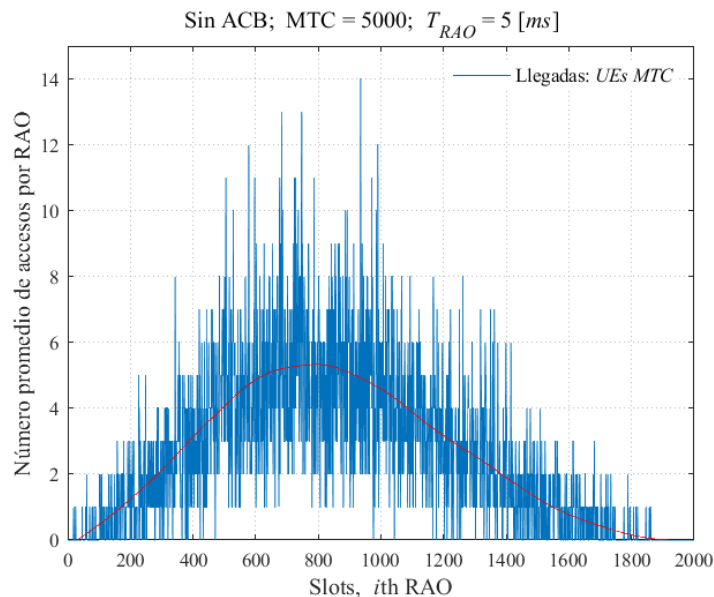
Los resultados de la  $P_S$  y del  $D_{95}$ , se obtuvieron del ajuste de los parámetros ACB, en el cual se consideró un rango de variación, donde, la probabilidad de bloqueo es de  $P_{ACB} = \{0.1, 0.3, 0.5, 0.9\}$  y para los tiempos de bloqueo es de  $T_{ACB} = \{1, 2, 3, 4, 5, 8, 16\}$  [s]. También, para obtener la  $P_S$  se consideró los parámetros de configuración del RACH (Tabla 7) y se optó modificar la periodicidad del PRACH en la simulación. La primera periodicidad se configura con una  $T_{RAO} = 5$  ms (*prach-ConfigIndex* = 6) y para la segunda periodicidad se configura con una de  $T_{RAO} = 1$  ms. En ambos casos, se lleva a cabo una variación gradual de los parámetros ACB considerando las diferentes cargas de tráfico (bajo, medio y alto) antes mencionadas. En la Ilustración 16, se muestran los parámetros de entrada y los resultados que se obtienen al realizar las configuraciones en la simulación propuesta.

#### 4.1 Resultados: $P_S$ y $D_{95}$ con una carga baja de tráfico de 5000 UEs MTC

A continuación, en este apartado se analiza las métricas de rendimiento ( $P_S$ ,  $D_{95}$ ) de una red LTE-A con cargas bajas de tráfico (5000 UEs MTC), donde se integra el ajuste de los parámetros ACB ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) y la variación de la periodicidad del RACH ( $T_{RAO}$ ). Además, para este estudio, se consideran cuatro análisis clave. En el primer análisis, se explora las métricas de rendimiento y el número promedio de accesos por RAO en ausencia del esquema ACB en la red LTE-A. Luego, en el segundo análisis, se realiza un estudio detallado de las mismas métricas de rendimiento, considerando la implementación y el ajuste de los parámetros ACB y a su vez, una configuración de periodicidad de  $T_{RAO}=5ms$ . Posteriormente, en el tercer análisis, se repite el mismo procedimiento anterior, pero esta vez ajustando la periodicidad de  $T_{RAO}$  a un  $1ms$ . Por último, se evalúa cada periodicidad ( $1ms$ ,  $5ms$ ) del RACH y se identifica las configuraciones óptimas de los parámetros ACB que den como resultado una  $P_S \geq 0.95$  y un tiempo óptimo (bajo) en el  $D_{95}$  cuando la red LTE-A demande escenarios con cargas bajas de tráfico.

##### 4.1.1 Análisis (5000 UEs MTC sin ACB): $P_S$ y $D_{95}$ con un $T_{RAO}$ de 5 ms y 1ms

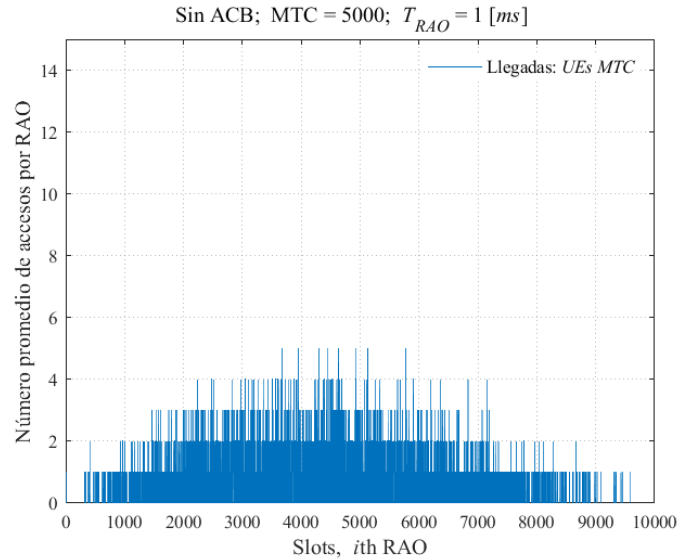
En primer lugar, se analiza el número promedio de accesos por RAO de 5000 UEs MTC descartando la implementación del esquema ACB, y su vez, considerando la variación de la periodicidad del RACH ( $T_{RAO} = 5ms$  y  $1ms$ ). En este análisis el promedio de accesos por RAO corresponde a la cantidad de UEs MTC que inician su RAP basado en contención en el  $i$  –ésimo RAO. Como tal, los resultados que se muestran en la Ilustración 17 y en la Ilustración 18, indican que la presencia de 5000 UEs MTC del modelo de tráfico 2 del estándar 3GPP, no generan congestión en el RACH, y esto sucede porque las llegadas de los UEs MTC de la distribución *Beta* (3,4), no superan la capacidad disponible del PRACH ( $C(54) = 20.05$ , llegadas de UEs MTC por RAO).



**Ilustración 17.** Número promedio de accesos por RAO sin ACB para una carga baja de tráfico de 5000 UEs MTC y con un  $T_{RAO} = 5$  ms.

**Fuente:** Autor

Como se observa en la ilustración 17, para una periodicidad de  $T_{RAO}=5ms$  la llegada máxima promedio es igual a 5.33 UEs MTC por RAO y para una periodicidad  $T_{RAO}=1ms$  la llegada máxima promedio es igual a 5.00 UEs MTC por RAO (Ilustración 18). Por lo tanto, existe una variación en la distribución de llegada de los UEs MTC entre ambas configuraciones de periodicidad.



**Ilustración 18.** Número promedio de accesos por RAO sin ACB para una carga baja de tráfico de 5000 UEs MTC y con un  $T_{RAO} = 1ms$ .

**Fuente:** Autor

Como se mencionó anteriormente, la presencia de 5000 UEs MTC en la eNB, no genera congestión en el RACH, sin embargo, es necesario analizar las métricas de rendimiento para determinar si los UEs MTC tienen la probabilidad de acceder a la red sin la implementación del esquema ACB. Los resultados obtenidos (Tabla 9) del modelo de simulación propuesto para escenarios con cargas bajas de tráfico y sin esquema ACB, se obtiene como resultado una  $P_S$  igual a 100%, es decir, la  $P_S$  se mantiene en un valor superior al 95% para cada configuración de periodicidad (1ms, 5ms). Además, los tiempos registrados en el  $D_{95}$ , son sumamente bajos.

**Tabla 9.** Resultados de la  $P_S$  y del  $D_{95}$  sin parámetros ACB y con una carga baja de tráfico de 5000 UEs MTC y un  $T_{RAO}$  de 5 ms y 1 ms.

**Fuente:** Autor

Dispositivos MTC	$T_{RAO} [ms]$	$P_S$	$D_{95}[ms]$
5000	5	1.00	59.50
5000	1	1.00	43.70

En consecuencia, se deduce que, en escenarios con carga baja de tráfico (5000 UEs MTC), las métricas de rendimiento son excepcionales sin la necesidad de incluir un esquema ACB. Además, se destaca que la configuración con  $T_{RAO}=1ms$ , proporciona el tiempo más corto en el  $D_{95}$  (43.70 ms).



#### 4.1.2 Análisis (5000 UEs MTC): $P_S$ y $D_{95}$ con una periodicidad de $T_{RAO} = 5\text{ ms}$

En el análisis anterior, se demostró que en escenarios con cargas bajas de tráfico y sin la implementación del esquema ACB, se pueden obtener métricas de rendimiento óptimas para la red LTE-A. Sin embargo, para este estudio se analiza el impacto que genera el esquema ACB en el retardo de las comunicaciones IoT en escenarios que demanden diferentes tráficos (bajo, medio y alto), en especial, en escenarios con cargas altas de tráfico (30000 UEs MTC). A continuación, en la siguiente Tabla 10, se exponen los resultados obtenidos de: la  $P_S \geq 0.95$ , los tiempos del  $D_{95}$  para cada  $P_S$  y las configuraciones del esquema ACB. Estos resultados son de las cargas bajas de tráfico que tienen una periodicidad en el RACH de  $T_{RAO}=5\text{ms}$ .

**Tabla 10.** Resultados:  $P_S \geq 0.95$  y  $D_{95}$ , bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) ACB con una carga baja de tráfico de 5000 UEs MTC y un  $T_{RAO} = 5\text{ ms}$ .

*Fuente:* Autor

Dispositivos MTC	$P_{ACB}$	$T_{ACB}$ [s]	$P_S$	$D_{95}$ [ms]
5000	0.1	1	1.00	28359.00
5000	0.1	2	0.99	54394.90
5000	0.1	3	0.96	71514.00
5000	0.3	1	1.00	8044.00
5000	0.3	2	1.00	16129.00
5000	0.3	3	1.00	23889.00
5000	0.3	4	1.00	32969.00
5000	0.3	5	1.00	37759.10
5000	0.3	8	0.99	57042.10
5000	0.5	1	1.00	4009.00
5000	0.5	2	1.00	7854.00
5000	0.5	3	1.00	11959.00
5000	0.5	4	1.00	15244.00
5000	0.5	5	1.00	20124.00
5000	0.5	8	1.00	32294.00
5000	0.5	16	0.99	57205.80
5000	0.9	1	1.00	1099.80
5000	0.9	2	1.00	2046.00
5000	0.9	3	1.00	2974.00
5000	0.9	4	1.00	4039.00
5000	0.9	5	1.00	5269.00
5000	0.9	8	1.00	8034.50
5000	0.9	16	1.00	16534.00

Los resultados obtenidos (Tabla 10) del modelo de simulación propuesto para escenarios con cargas bajas de tráfico que integran un esquema ACB, dan como resultados probabilidades superiores al 95% para la periodicidad de  $5\text{ms}$ , no obstante, los tiempos registrados en el  $D_{95}$ , van aumentando desde los  $1099.80\text{ms}$  hasta los  $71514.00\text{ms}$ . En consecuencia, se deduce que, en escenarios con carga baja de tráfico (5000 UEs MTC), las probabilidades de acceso satisfactorio son óptimas y el tiempo más bajo en el  $D_{95}$  es de  $1099.80\text{ms}$ , este tiempo se obtiene con la configuración de la  $P_{ACB}=0.9$  y el  $T_{ACB}=1\text{s}$ .



Por lo tanto, se determina que no se recomendable implementar el esquema ACB con periodicidad de  $T_{RAO}=5ms$ , en escenarios con cargas bajas de tráfico. Ya que el tiempo (Tabla 9: 43.70 ms) en el  $D_{95}$  sin ACB y con periodicidad de 1ms, es mucho mejor, al tiempo del  $D_{95}$  que incorpora un esquema ACB y una configuración de  $T_{RAO}=5ms$ .

#### 4.1.3 Análisis (5000 UEs MTC): $P_S$ y $D_{95}$ con una periodicidad de $T_{RAO} = 1 ms$

En este análisis, se emplean los procedimientos antes descritos (5000 UEs MTC y  $T_{RAO}=5ms$ ) con la diferencia, de que se varia la periodicidad del RACH, estableciendo un  $T_{RAO}$  de 1ms. Los resultados del presente estudio se muestran en la Tabla 11 e incluyen las probabilidades  $P_S$  mayores al 0.95, los tiempos correspondientes al  $D_{95}$  para cada  $P_S$  y las configuraciones del esquema ACB. Estos resultados se derivan de los escenarios con cargas bajas de tráfico y de una periodicidad en el RACH de  $T_{RAO}=1ms$ .

**Tabla 11.** Resultados:  $P_S \geq 0.95$  y  $D_{95}$ , bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) ACB con una carga baja de tráfico de 5000 UEs MTC y un  $T_{RAO} = 1 ms$ .

*Fuente:* Autor

Dispositivos MTC	$P_{ACB}$	$T_{ACB}$ [s]	$P_S$	$D_{95}$ [ms]
5000	0.3	1	1.00	7746.80
5000	0.5	1	1.00	3984.00
5000	0.5	2	1.00	7642.00
5000	0.5	3	0.98	10182.50
5000	0.5	4	0.95	11725.80
5000	0.9	1	1.00	1024.00
5000	0.9	2	1.00	2145.30
5000	0.9	3	1.00	3000.60
5000	0.9	4	1.00	4243.00
5000	0.9	5	1.00	5199.10
5000	0.9	8	0.99	7967.50

Los resultados obtenidos (Tabla 11) del modelo de simulación propuesto para escenarios con cargas bajas de tráfico que integran un esquema ACB, dan como resultados probabilidades superiores al 95% para la periodicidad de 1ms, no obstante, los tiempos registrados en el  $D_{95}$ , van aumentando desde los 1024.00ms hasta los 11725.80ms. En consecuencia, se establece que, en escenarios con carga baja de tráfico (5000 UEs MTC), las probabilidades de acceso satisfactorio son óptimas y el tiempo más bajo del  $D_{95}$  es de 1024.00ms, este tiempo se obtiene con la configuración de la  $P_{ACB}=0.9$  y el  $T_{ACB}=1s$ . Por lo tanto, se determina que no se recomendable implementar el esquema ACB con periodicidad de  $T_{RAO}=1ms$ , en escenarios con cargas bajas de tráfico. Ya que el tiempo (Tabla 9: 43.70 ms) en el  $D_{95}$  sin ACB y con periodicidad de 1ms, es mucho mejor, con respecto al tiempo del  $D_{95}$  que incorpora un esquema ACB y una configuración de  $T_{RAO}=1ms$ .

#### 4.1.4 Análisis (5000 UEs MTC): $P_S$ y $D_{95}$ óptimos ( $T_{RAO} = 5\text{ ms}$ VS $T_{RAO} = 1\text{ ms}$ )

Por último, para determinar la probabilidad  $P_S \geq 0.95$  y el tiempo óptimo en el  $D_{95}$ , en los escenarios con cargas bajas de tráfico, en esta sección, se compara y se evalúa las métricas de rendimiento más destacadas de cada periodicidad, es decir, se busca las mejores probabilidades de acceso satisfactorio que generen tiempos bajos en el  $D_{95}$ . Además, se identifican los parámetros óptimos del esquema ACB ( $P_{ACB}$  y  $T_{ACB}$ ), que generen los resultados previamente mencionados. A continuación, se detalla en la Tabla 12 los resultados óptimos ( $P_S$  y  $D_{95}$ ) de cada periodicidad (1ms, 5ms), teniendo en cuenta una  $P_S$  mayor o igual a 0.95 y considerando el menor tiempo en el  $D_{95}$ .

**Tabla 12.** Resultados óptimos de la  $P_S$  y del  $D_{95}$  bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) ACB con una carga baja de tráfico de 5000 UEs MTC y un  $T_{RAO}$  de 5 ms y 1 ms.

*Fuente:* Autor

Dispositivos MTC	$T_{RAO}$ [ms]	$P_{ACB}$	$T_{ACB}$ [s]	$P_S$	$D_{95}$ [ms]
5000	5	0.9	1	1.00	1099.80
5000	1	0.9	1	1.00	1024.00

Como se observa en la Tabla 12, para un escenario con cargas bajas de tráfico y una configuración de periodicidad de  $T_{RAO} = 1\text{ ms}$  y  $5\text{ ms}$ , se logra obtener probabilidades de acceso satisfactorio del 100% con tiempos bajos en el  $D_{95}$  ( $D_{95} \approx 1$  segundo). Sin embargo, estos tiempos, son altos con respecto a los tiempos del  $D_{95}$  sin ACB (Tabla 9). Esto sucede cuando se implementa el esquema ACB y el tiempo de bloqueo ( $T_{ACB}$ ) de dicho esquema, se incluye en el tiempo del  $D_{95}$ . Por lo tanto, con una configuración de  $T_{ACB}=1\text{s}$ , existirá un incremento de 1 segundo en los tiempos del  $D_{95}$ .

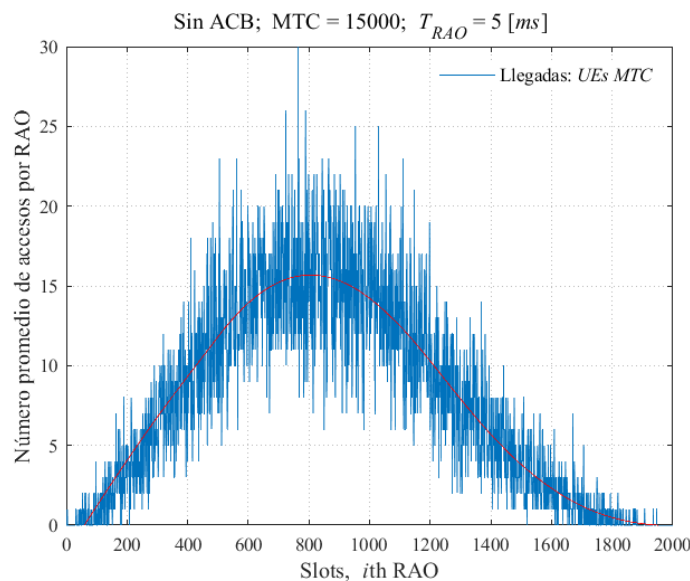
Por otra parte, para determinar si se incluye el esquema ACB en este tipo de escenarios, primero se determina que la presencia de 5000 UEs MTC del modelo de tráfico 2 del estándar 3GPP, no genera congestión en el RACH ( $C(54) = 20.05$ , llegadas de UEs MTC por RAO). En consecuencia, si no se registra congestión en el RACH, no se aconseja implementar del esquema ACB. Esto se debe a que la implementación de dicho esquema aumentaría el tiempo del  $D_{95}$ , lo que a su vez retrasaría el acceso de los UEs MTC a la eNB. Por otro lado, en situaciones donde la red experimenta incrementos dinámicos en la cantidad de UEs MTC, se debería implementar el esquema ACB. Esta medida asegura el acceso de todos los UEs MTC a la red y, al mismo tiempo, promueve la confiabilidad de las comunicaciones IoT en las redes LTE-A.

## 4.2 Resultados: $P_S$ y $D_{95}$ con una carga media de tráfico de 15000 UEs MTC

En esta sección se analiza las métricas de rendimiento ( $P_S$ ,  $D_{95}$ ) de una red LTE-A con cargas medias de tráfico (15000 UEs MTC), donde se integra el ajuste de los parámetros ACB ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) y la variación de la periodicidad del RACH ( $T_{RAO}$ ). Además, para esta sección, se consideran los mismos análisis clave de la sección anterior (análisis: 5000 UEs MTC). Donde en el primer análisis, se examina las métricas de rendimiento y el promedio de accesos por RAO en la red LTE-A, sin la implementación del esquema ACB. Luego, en el segundo análisis, se lleva a cabo un estudio detallado de las mismas métricas de rendimiento, teniendo en cuenta la implementación y la configuración de los parámetros ACB, junto con una periodicidad de  $T_{RAO}=5ms$ . En el tercer análisis, se repite el procedimiento anterior, pero esta vez ajustando la periodicidad de  $T_{RAO}$  a  $1ms$ . Por último, se evalúan ambas periodicidades ( $1ms$  y  $5ms$ ) del RACH y se identifican las configuraciones óptimas de los parámetros ACB que resulten una probabilidad  $P_S \geq 0.95$  y un tiempo óptimo (bajo) en el  $D_{95}$  cuando la red LTE-A se encuentra en situaciones de carga media de tráfico.

### 4.2.1 Análisis (15000 UEs MTC sin ACB): $P_S$ y $D_{95}$ con un $T_{RAO}$ de 5 ms y 1ms

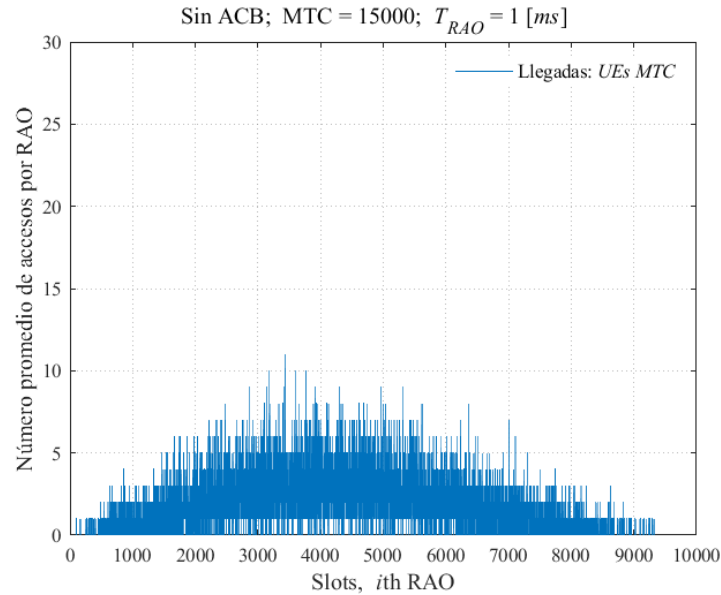
Para este análisis, primero se efectúa la evaluación del promedio de accesos por RAO de 15000 UEs MTC, sin el esquema ACB y teniendo en cuenta la variación en la periodicidad del RACH, con un  $T_{RAO}$  igual a  $5ms$  y  $1ms$ . En esta evaluación, el promedio de accesos por RAO corresponde a la cantidad de UEs MTC que inician su RAP basado en contención en el  $i$  –ésimo RAO. Los resultados presentados en la Ilustración 19 y en la Ilustración 20, reflejan que la presencia de 15000 UEs MTC del modelo de tráfico 2 del estándar 3GPP no causa congestión en el RACH. Esto se debe a que las llegadas de los UEs MTC de la distribución *Beta* (3,4), no exceden la capacidad disponible del PRACH ( $C(54) = 20.05$ , llegadas de UEs MTC por RAO).



**Ilustración 19.** Número promedio de accesos por RAO para una carga media de tráfico de 15000 UEs MTC y con un  $T_{RAO} = 5 ms$

**Fuente:** Autor

Además, en la Ilustración 19, se visualiza que con una periodicidad de  $T_{RAO}$  de  $5ms$ , las llegadas máximas promedio son de 15.32 UEs MTC por RAO, mientras que con una periodicidad de  $T_{RAO}$  de  $1ms$ , las llegadas máximas promedio es de 11.00 UEs MTC por RAO (Ilustración 20). Por lo tanto, se evidencia una variación en la distribución de llegada de los UEs MTC entre ambas configuraciones de periodicidad, además, es más notable la distribución de los UEs MTC con una periodicidad de  $1ms$ .



**Ilustración 20.** Número promedio de accesos por RAO para una carga media de tráfico de 15000 UEs MTC y con un  $T_{RAO} = 1ms$

**Fuente:** Autor

También en este análisis, es esencial evaluar las métricas de rendimiento para determinar si los UEs MTC pueden acceder a la red, sin la necesidad de integrar un esquema ACB en dicha red. Los resultados obtenidos (Tabla 13) del modelo de simulación diseñado para escenarios de carga media de tráfico y sin ACB, muestran que la probabilidad  $P_S$  alcanza el 98%. Esto significa que la  $P_S$  se mantiene por encima del 95% en las dos configuraciones de periodicidad ( $1ms$ ,  $5ms$ ). Además, los tiempos registrados en el  $D_{95}$  son notablemente bajos.

**Tabla 13.** Resultados de la  $P_S$  y del  $D_{95}$  sin parámetros ACB y con una carga media de tráfico de 15000 UEs MTC y un  $T_{RAO}$  de  $5ms$  y  $1ms$ .

**Fuente:** Autor

Dispositivos MTC	$T_{RAO} [ms]$	$P_S$	$D_{95}[ms]$
15000	5	0.98	122.90
15000	1	0.98	92.70

En conclusión, en escenarios con cargas medias de tráfico de 15000 UEs MTC, las métricas de rendimiento son óptimas, sin la necesidad de implementar el esquema ACB. También, cabe destacar que la configuración con  $T_{RAO}$  de  $1ms$  ofrece el tiempo más bajo al  $D_{95}$ , con un valor de  $92.70ms$ .

#### 4.2.2 Análisis (15000 UEs MTC): $P_S$ y $D_{95}$ con una periodicidad de $T_{RAO} = 5 ms$

Después del análisis de las métricas de rendimiento sin el esquema ACB, procedemos a realizar el siguiente análisis donde se considera la implementación del esquema ACB y la configuración de la periodicidad del RACH ( $T_{RAO}=5ms$ ). A continuación, en la Tabla 14, se presentan los resultados obtenidos de: la  $P_S \geq 0.95$ , los tiempos del  $D_{95}$  para cada  $P_S$  y las configuraciones del esquema ACB. Estos resultados son de las cargas medias de tráfico que tienen una configuración de periodicidad en el RACH de  $T_{RAO}=5ms$ .

**Tabla 14.** Resultados:  $P_S \geq 0.95$  y  $D_{95}$ , bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) ACB con una carga media de tráfico de 15000 UEs MTC y un  $T_{RAO} = 5 ms$ .

*Fuente:* Autor

Dispositivos MTC	$P_{ACB}$	$T_{ACB}$ [s]	$P_S$	$D_{95}$ [ms]
15000	0.1	1	1.00	29099.00
15000	0.1	2	0.99	54479.00
15000	0.1	3	0.97	70174.40
15000	0.3	1	1.00	8039.50
15000	0.3	2	1.00	16089.30
15000	0.3	3	1.00	23784.00
15000	0.3	4	1.00	31544.00
15000	0.3	5	1.00	40034.80
15000	0.3	8	0.99	58589.40
15000	0.5	1	1.00	3942.60
15000	0.5	2	1.00	7934.00
15000	0.5	3	1.00	11584.00
15000	0.5	4	1.00	15834.60
15000	0.5	5	1.00	19074.50
15000	0.5	8	1.00	31404.10
15000	0.5	16	0.99	56659.80
15000	0.9	1	0.98	1075.50
15000	0.9	2	0.99	2122.70
15000	0.9	3	1.00	3129.40
15000	0.9	4	1.00	4164.20
15000	0.9	5	1.00	5219.40
15000	0.9	8	1.00	8299.90
15000	0.9	16	1.00	16844.90

Como se detalla en la Tabla 14, los resultados de la  $P_S$  son superiores al 95% para la periodicidad de  $5ms$ , no obstante, los tiempos registrados en el  $D_{95}$ , van aumentando desde los  $1075.50ms$  hasta los  $70174.40ms$ . Por consiguiente, se determina que, en escenarios con carga media de tráfico (15000 UEs MTC), las probabilidades de acceso satisfactorio son óptimas y el tiempo más bajo en el  $D_{95}$  es de  $1075.50ms$ . Este tiempo se obtiene con la configuración de la  $P_{ACB}=0.9$  y el  $T_{ACB}=1s$ . Por lo tanto, no es recomendable implementar el esquema ACB con una periodicidad de  $T_{RAO}=5ms$ , en escenarios con cargas medias de tráfico. Puesto que el tiempo (Tabla 13:  $92.70 ms$ ) en el  $D_{95}$  sin ACB y con periodicidad de  $1ms$ , es mucho mejor, al tiempo del  $D_{95}$  que incorpora un esquema ACB y una configuración de  $T_{RAO}=5ms$ .

#### 4.2.3 Análisis (15000 UEs MTC): $P_S$ y $D_{95}$ con una periodicidad de $T_{RAO} = 1 ms$

Ahora, para este análisis, se emplean los mismos procedimientos anteriores de los 15000 UEs MTC ( $T_{RAO}=5ms$ ) con la diferencia que, en este caso, se varía la periodicidad del RACH, estableciendo un  $T_{RAO}$  de  $1ms$ . Los resultados de este análisis se detallan en la Tabla 15 e incluyen las probabilidades  $P_S$  mayores al 0.95, los tiempos correspondientes al  $D_{95}$  para cada  $P_S$  y las configuraciones del esquema ACB. Estos resultados obtenidos son del modelo de simulación donde se consideran escenarios con cargas medias de tráfico y una periodicidad en el RACH de  $T_{RAO}=1ms$ .

**Tabla 15.** Resultados:  $P_S \geq 0.95$  y  $D_{95}$ , bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) ACB con una carga media de tráfico de 15000 UEs MTC y un  $T_{RAO} = 1 ms$ .

*Fuente:* Autor

Dispositivos MTC	$P_{ACB}$	$T_{ACB}$ [s]	$P_S$	$D_{95}$ [ms]
15000	0.3	1	1.00	7735.30
15000	0.3	2	0.95	11927.00
15000	0.5	1	1.00	3991.10
15000	0.5	2	1.00	7699.10
15000	0.5	3	0.98	10102.10
15000	0.5	4	0.95	11746.50
15000	0.9	1	1.00	1061.15
15000	0.9	2	1.00	2124.70
15000	0.9	3	1.00	3105.30
15000	0.9	4	1.00	4183.30
15000	0.9	5	1.00	5220.60
15000	0.9	8	0.99	7969.40

En los siguientes resultados de la Tabla 15, se muestra que las probabilidades de acceso satisfactorio superan el 95% cuando se utiliza una periodicidad de  $1ms$ . Sin embargo, es relevante destacar que los tiempos registrados en el  $D_{95}$  experimentan un aumento significativo, que va desde los  $1061.15ms$  hasta los  $11927.00ms$ . Por lo tanto, para escenarios con cargas medias de tráfico (15000 UEs MTC), se puede concluir que las probabilidades de acceso satisfactorio son óptimas, y el tiempo más bajo registrado en el  $D_{95}$  es de  $1061.15ms$ . Estos resultados óptimos se obtuvieron al configurar los parámetros ACB con una  $P_{ACB} = 0.9$  y un  $T_{ACB} = 1s$ . En conclusión, no se recomienda implementar el esquema ACB con una periodicidad de  $T_{RAO}$  de  $1ms$  en escenarios con cargas medias de tráfico. Esto se debe a que el tiempo registrado en el  $D_{95}$  sin ACB, es significativamente menor con respecto al tiempo del  $D_{95}$  que incorpora un esquema ACB y una configuración de  $T_{RAO}=1ms$ .

#### 4.2.4 Análisis (15000 UEs MTC): $P_S$ y $D_{95}$ óptimos ( $T_{RAO} = 5 ms$ VS $T_{RAO} = 1 ms$ )

Por último, para determinar la probabilidad  $P_S \geq 0.95$  y el tiempo óptimo en el  $D_{95}$ , en los escenarios con cargas medias de tráfico, en esta sección, se compara y se evalúa las métricas de rendimiento más destacadas de cada periodicidad, es decir, se busca las mejores probabilidades de acceso satisfactorio que generen tiempos bajos en el  $D_{95}$ .

Además, en esta sección se identifican los parámetros óptimos del esquema ACB ( $P_{ACB}$  y  $T_{ACB}$ ), que generen los resultados previamente mencionados. A continuación, en la Tabla 16, se detallan los resultados óptimos ( $P_S$  y  $D_{95}$ ) de cada periodicidad (1ms, 5ms), teniendo en cuenta una  $P_S$  mayor o igual a 0.95 y considerando el menor tiempo en el  $D_{95}$ .

**Tabla 16.** Resultados óptimos de la  $P_S$  y del  $D_{95}$  bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) ACB con una carga media de tráfico de 15000 UEs MTC y dos  $T_{RAO}$  de 5 ms y 1 ms.

**Fuente:** Autor

Dispositivos MTC	$T_{RAO}$ [ms]	$P_{ACB}$	$T_{ACB}$ [s]	$P_S$	$D_{95}$ [ms]
15000	5	0.9	1	1.00	1075.50
15000	1	0.9	1	1.00	1061.15

Como se indica en la Tabla 16, para escenarios con cargas medias de tráfico y con dos configuraciones de periodicidad ( $T_{RAO}=1ms$  y  $5ms$ ), se logra obtener para cada periodicidad una  $P_S$  igual a 100% con tiempos relativamente bajos en el  $D_{95}$  (aproximadamente 1 segundo). Sin embargo, estos tiempos, son altos con respecto a los tiempos del  $D_{95}$  que están configurados sin el esquema ACB (Tabla 13). Esto sucede cuando se implementa el esquema ACB y el tiempo de bloqueo ( $T_{ACB}$ ) de dicho esquema, se incluye en el tiempo del  $D_{95}$ . Por lo tanto, con una configuración de  $T_{ACB}=1s$ , existirá un incremento de 1 segundo en los tiempos del  $D_{95}$

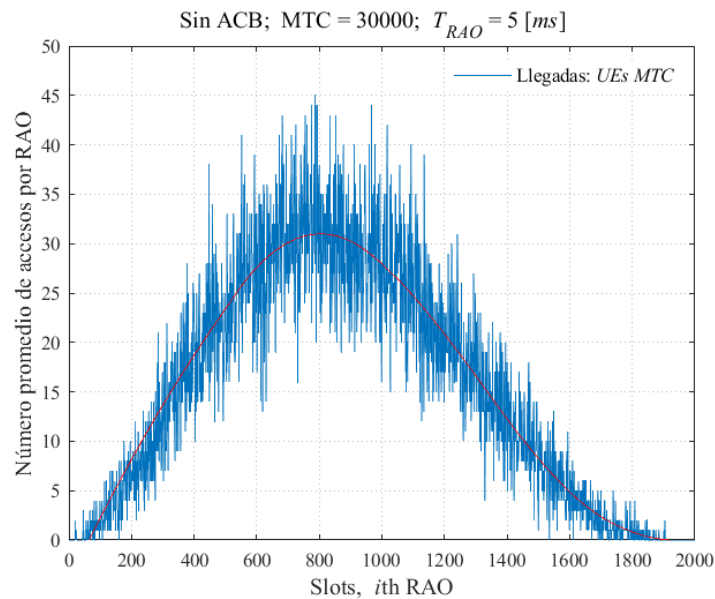
Por otro lado, para decidir si se debe incorporar el esquema ACB en las redes LTE-A en los escenarios con cargas medias de tráfico, se considera la evaluación inicial de esta sección. Donde se determina que la presencia de 15000 UEs MTC del modelo de tráfico 2 del estándar 3GPP, no genera congestiones en el RACH ( $C(54) = 20.05$ , llegadas de UEs MTC por RAO). Por lo tanto, en situaciones donde no se observa congestión en el RACH, no se recomienda la implementación del esquema ACB. Dado que la implementación de dicho esquema aumentaría el tiempo del  $D_{95}$ , lo cual retrasaría el acceso de los UEs MTC a la eNB. Sin embargo, en situaciones donde la red experimenta incrementos dinámicos del número de llegadas de los UEs MTC, se deberá implementar el esquema ACB. Esta implementación garantizará el acceso de todas las UEs MTC a la red y, al mismo tiempo, fortalecerá la confiabilidad de las comunicaciones de IoT en las redes LTE-A.

### 4.3 Resultados: $P_S$ y $D_{95}$ con una carga alta de tráfico de 30000 UEs MTC

Por último, en este apartado se analiza las métricas de rendimiento ( $P_S$ ,  $D_{95}$ ) de una red LTE-A con cargas altas de tráfico (30000 UEs MTC), donde se integra el ajuste de los parámetros ACB ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) y la variación de la periodicidad del RACH ( $T_{RAO}$ ). Además, para esta sección, se consideran los mismos análisis clave de las secciones anteriores (análisis: 5000 y 15000 UEs MTC). También en esta sección, se lleva a cabo un análisis más profundo, dado que en escenarios con cargas altas de tráfico es necesario de la implementación del esquema ACB.

#### 4.3.1 Análisis (30000 UEs MTC sin ACB): $P_S$ y $D_{95}$ con un $T_{RAO}$ de 5 ms y 1ms

Ahora en esta sección, se analiza el número promedio de accesos por RAO de 30000 UEs MTC descartando la implementación del esquema ACB, y su vez, considerando la variación de la periodicidad del RACH ( $T_{RAO} = 5ms$  y  $1ms$ ). En este análisis el promedio de accesos por RAO corresponde a la cantidad de UEs MTC que inician su RAP basado en contención en el  $i$  – ésimo RAO. Como tal, los resultados del presente proyecto que se muestran en la Ilustración 21 ( $T_{RAO}=5ms$ ), indican que la presencia de 30000 UEs MTC del modelo de tráfico 2 del estándar 3GPP, generan congestión en el RACH, y esto sucede porque las llegadas de los UEs MTC de la distribución *Beta* (3,4), superan la capacidad disponible del PRACH ( $C(54) = 20.05$ , llegadas de UEs MTC por RAO).



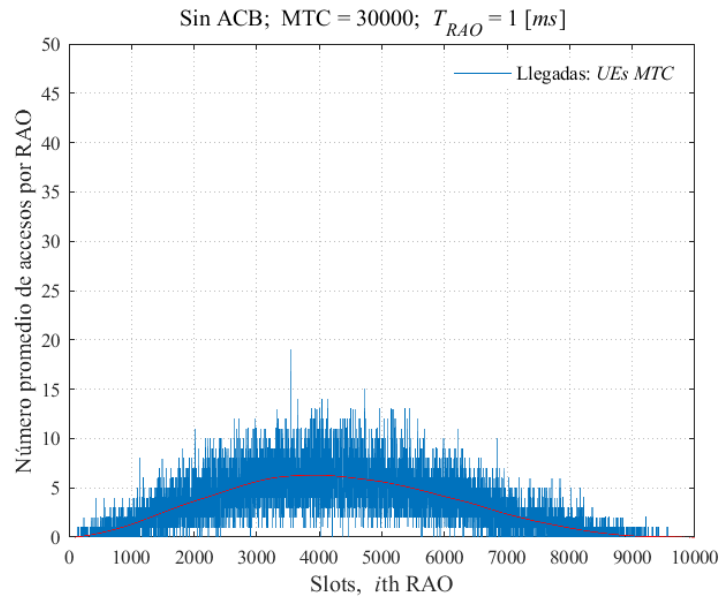
**Ilustración 21.** Número promedio de accesos por RAO para una carga alta de tráfico de 30000 UEs MTC y con un  $T_{RAO} = 5 ms$ .

**Fuente:** Autor

Por otra parte, en la Ilustración 22 ( $T_{RAO}=1ms$ ), se muestra que la presencia de 30000 UEs MTC, no generan congestión en el RACH, es decir con una configuración de periodicidad de 1ms, se logra distribuir mejor las llegadas de los UEs MTC en la red LTE-A.



También, la llegada máxima promedio para una periodicidad de  $T_{RAO}=5ms$  (Ilustración 21) es igual a 31.14 UEs MTC por RAO y para una periodicidad de  $T_{RAO}=1ms$  la llegada máxima promedio es igual a 6.29 UEs MTC por RAO (Ilustración 22).



**Ilustración 22.** Número promedio de accesos por RAO para una carga alta de tráfico de 30000 UEs MTC y con un  $T_{RAO} = 1ms$ .

**Fuente:** Autor

Como se mencionó anteriormente, la presencia de 30000 UEs MTC en la eNB, para una configuración de  $T_{RAO}=1ms$ , no genero congestión en el RACH. Sin embargo, para una configuración de  $T_{RAO}=5ms$ , si genero congestión en el canal. Por consiguiente, para este análisis es necesario evaluar las métricas de rendimiento para determinar si los UEs MTC tienen la probabilidad de acceder a la red sin la implementación del esquema ACB. Los resultados obtenidos (Tabla 17) del modelo de simulación propuesto para escenarios con cargas altas de tráfico y sin esquema ACB, se obtiene como resultados unas probabilidades sumamente bajas, es decir, la  $P_S$  se mantiene por debajo del 95% para cada configuración de periodicidad (1ms, 5ms). Además, los tiempos registrados en el  $D_{95}$ , son poco bajos.

**Tabla 17.** Resultados de la  $P_S$  y del  $D_{95}$  sin parámetros ACB para una carga alta de tráfico de 30000 UEs MTC y un  $T_{RAO}$  de 5 ms y 1 ms.

**Fuente:** Autor

Dispositivos MTC	$T_{RAO} [ms]$	$P_S$	$D_{95}[ms]$
30000	5	0.31	182.90
30000	1	0.66	140.80

En conclusión, se determina que, en escenarios con cargas altas de tráfico (30000 UEs MTC), las métricas de rendimiento son críticas al no implementar el esquema ACB. No obstante, también se destaca que la configuración con  $T_{RAO}=1ms$ , proporciona el tiempo más bajo del  $D_{95}$  (140.80ms) de este análisis.

#### 4.3.2 Análisis (30000 UEs MTC): $P_S$ y $D_{95}$ con una periodicidad de $T_{RAO} = 5 ms$

Anteriormente, se demostró que en escenarios con cargas altas de tráfico y sin la implementación del esquema ACB, no se pueden obtener métricas de rendimiento óptimas. Por lo tanto, en este apartado se analiza el impacto que genera el esquema ACB en el retardo de las comunicaciones IoT en escenarios que demanden cargas altas de tráfico (30000 UEs MTC). A continuación, en la Tabla 18, se detallan los resultados obtenidos de: la  $P_S \geq 0.95$ , los tiempos del  $D_{95}$  para cada  $P_S$  y las configuraciones del esquema ACB. Estos resultados son de las cargas altas de tráfico que tienen una periodicidad en el RACH de  $T_{RAO}=5ms$ .

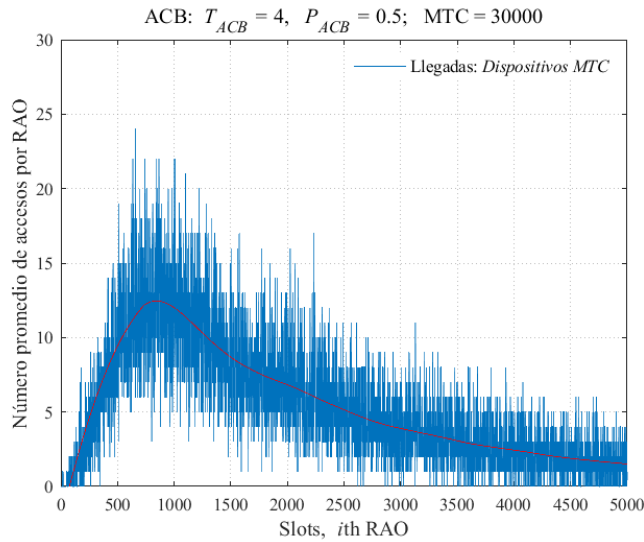
**Tabla 18.** Resultados:  $P_S \geq 0.95$  y  $D_{95}$ , bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) ACB con una carga alta de tráfico de 30000 UEs MTC y un  $T_{RAO} = 5 ms$ .

*Fuente:* Autor

Dispositivos MTC	$P_{ACB}$	$T_{ACB}$ [s]	$P_S$	$D_{95}$ [ms]
30000	0.1	1	1.00	27629.00
30000	0.1	2	0.99	53689.40
30000	0.1	3	0.97	70404.10
30000	0.3	2	0.98	15909.90
30000	0.3	3	1.00	23839.00
30000	0.3	4	1.00	32419.30
30000	0.3	5	1.00	38579.70
30000	0.3	8	0.99	59254.70
30000	0.5	4	0.97	15744.80
30000	0.5	5	0.99	19515.90
30000	0.5	8	0.99	30709.80
30000	0.5	16	0.98	57569.40

Los resultados obtenidos (Tabla 18) del modelo de simulación propuesto para escenarios con cargas altas de tráfico que integran un esquema ACB, dan como resultados probabilidades superiores al 95% para la periodicidad de  $5ms$ , Sin embargo, los tiempos registrados en el  $D_{95}$ , van aumentando desde los  $15744.80ms$  hasta los  $70404.10ms$ . por consiguiente, se determina que, en escenarios con carga alta de tráfico (30000 UEs MTC), las probabilidades de acceso satisfactorio son óptimas y el tiempo más bajo en el  $D_{95}$  es de  $15744.80ms$ , este tiempo optimo se obtiene con la configuración de los parámetros ACB como la  $P_{ACB}=0.5$  y el  $T_{ACB}=4s$ . Esta configuración asegura la disminución de las congestiones que se genera en el RACH cuando múltiples UEs MTC intentan acceder a la eNB de manera simultánea, además, esta configuración promueve la confiabilidad de las comunicaciones IoT en las redes LTE-A.

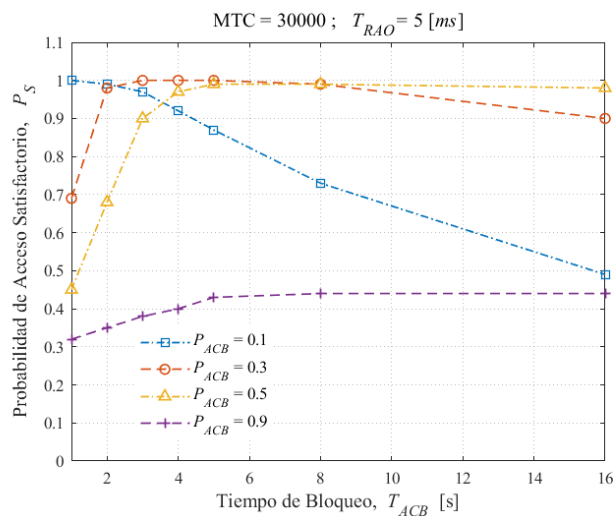
Por otra parte, también analizamos el impacto que genera el esquema ACB en las llegadas de los UEs MTC a la red. Como se puede visualizar en la Ilustración 23, el número promedio de accesos por RAO de los UEs MTC con una configuración de la  $P_{ACB} = 0,5$  y un  $T_{ACB} = 4$  [s], distribuyen las llegadas de los UEs MTC desde un máximo de 31.14 (Ilustración 21) hasta 12.45 UEs MTC por RAO (Ilustración 22). Por consiguiente, las llegadas máximas promedio se sitúa por debajo de la capacidad estimada del RACH ( $C(54) = 20.05$ ).



**Ilustración 23.** Número promedio de accesos por RAO con un tráfico de 30000 UEs MTC y una configuración de  $P_{ACB}=0.5$ ,  $T_{ACB}=0.4$  y un  $T_{RAO} = 5$  ms.

**Fuente:** Autor

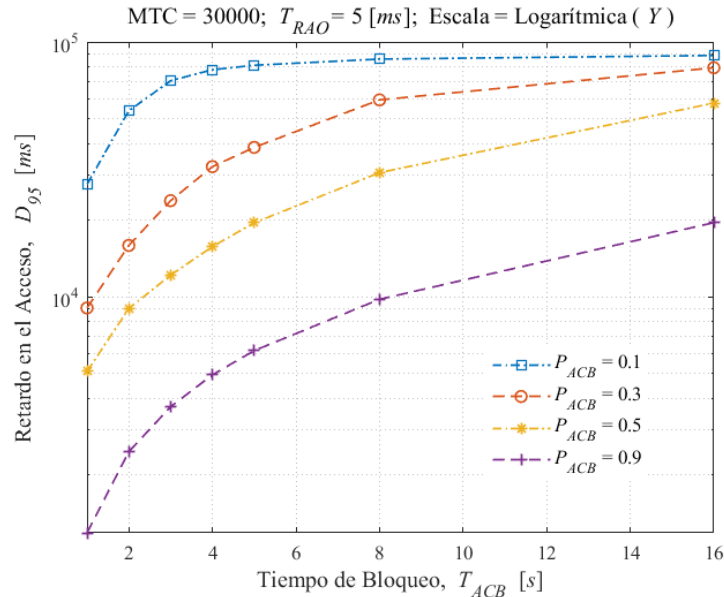
También, en la Ilustración 24, se representan las probabilidades de acceso satisfactorio para los 30000 UEs MTC, en función de los ajustes de  $P_{ACB}$  {0.1, 0.3, 0.5, 0.9},  $T_{ACB}$  {1, 2, 3, 4, 5, 8, 16} [s] y un  $T_{RAO} = 5$  [ms]. Para cada valor de  $P_{ACB}$  {0.3, 0.5}, la  $P_S$  experimenta un aumento a medida que se incrementa el  $T_{ACB}$ . No obstante, es importante destacar que para cada  $P_{ACB}$  existe un valor máximo de  $P_S$  que se alcanza en un punto específico de  $T_{ACB}$ . A partir de ese punto, la  $P_S$  no experimenta cambios significativos. Este comportamiento es fundamental para comprender cómo la combinación de  $P_{ACB}$  y  $T_{ACB}$  afecta la probabilidad de acceso satisfactorio en redes LTE-A, especialmente en escenarios de comunicaciones IoT que demanden cargas altas de tráfico. Por otro lado, para el valor de  $P_{ACB}$  {0.1, 0.9}, se observa una variación crítica en la  $P_S$  a medida que se incrementa el  $T_{ACB}$ . Estas variaciones indican que las configuraciones de  $P_{ACB}$  descritas, no son óptimas para disminuir la congestión del RACH.



**Ilustración 24.** Probabilidad de acceso satisfactorio ( $P_S$ ) bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) ACB con un tráfico de 30000 UEs MTC y un  $T_{RAO} = 5$  ms.

**Fuente:** Autor

A continuación, en la Ilustración 25, se presentan los tiempos del retardo en el acceso ( $D_{95}$ ) en escala logarítmica en el eje Y. Esta representación se realiza con la finalidad de identificar los cambios más significativos en los tiempos del  $D_{95}$ . También, se observa en la Ilustración 25 que un alto  $P_{ACB}$  y un bajo  $T_{ACB}$  reduce el tiempo de retardo en el acceso. Por el contrario, cuando se configura un  $P_{ACB}$  bajo y un  $T_{ACB}$  alto, se produce un aumento considerable del retardo en el acceso.



**Ilustración 25.** Retardo en el Acceso ( $D_{95}$ ) bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) ACB con un tráfico de 30000 UEs MTC y un  $T_{RAO} = 5$  ms.

**Fuente:** Autor

#### 4.3.3 Análisis (30000 UEs MTC): $P_S$ y $D_{95}$ con una periodicidad de $T_{RAO} = 1$ ms

De igual forma los resultados de la  $P_S$  para los escenarios con cargas altas de tráfico y con una periodicidad de  $T_{RAO}=1$  ms se detallan en la Tabla 19.

**Tabla 19.** Resultados:  $P_S \geq 0.95$  y  $D_{95}$ , bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) ACB con una carga alta de tráfico de 30000 UEs MTC y un  $T_{RAO} = 1$  ms.

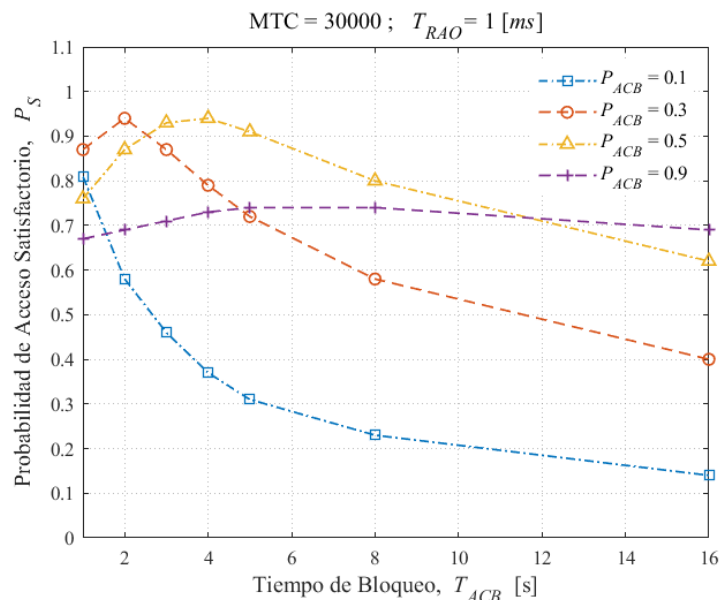
**Fuente:** Autor

Dispositivos MTC	$P_{ACB}$	$T_{ACB}$ [s]	$P_S$	$D_{95}$ [ms]
30000	0.3	2	0.94	12064.70
30000	0.5	3	0.93	10130.30
30000	0.5	4	0.94	11905.90
30000	0.5	5	0.91	11993.70

Los resultados obtenidos indican que ninguna combinación de los parámetros ACB logra una  $P_S$  superior al 95%. Además, se ha identificado que las combinaciones que incluyen una configuración de  $P_{ACB}$  igual a {0.3, 0.5}, alcanzan una  $P_S \geq 0.90$ . En consecuencia, el uso de una periodicidad de  $T_{RAO} = 1$  ms restringe significativamente las opciones disponibles para la configuración de los parámetros ACB, lo que puede ser un factor limitante por considerar

en la fiabilidad para el acceso de los UEs MTC en las comunicaciones IoT que demanden cargas altas de tráfico. Por lo tanto, en el presente análisis para una configuración con periodicidad de  $1ms$ , los tiempos del  $D_{95}$  no son considerados debido a que el  $P_S$  no cumple con el umbral del 0.95. Sin embargo, si la  $P_S$  no requiere ser tan estricta en ciertas aplicaciones IoT, se podrían contemplar los tiempos bajos del  $D_{95}$  cuando la  $P_S$  es mayor a 0.90. Por consiguiente, el tiempo bajo del  $D_{95}$  es igual a  $11905.90ms$  y la configuración de los parámetros ACB es la  $P_{ACB} = 0.5$  y el  $T_{ACB} = 4s$ , donde dichas configuraciones dan como resultado una  $P_S$  igual a 0.94.

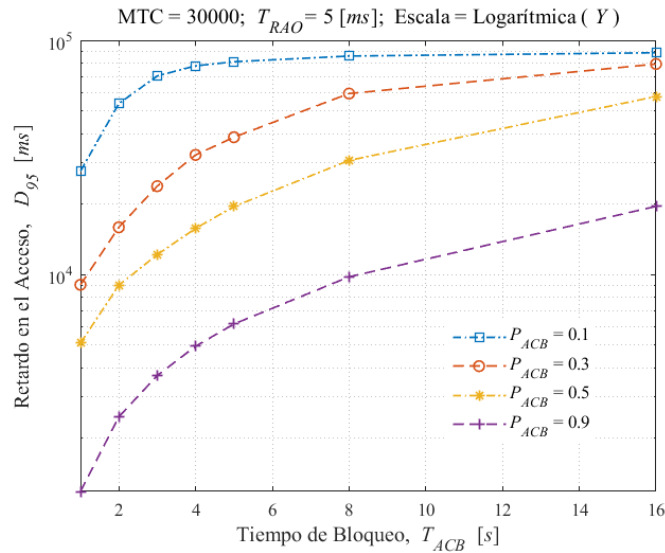
También, en la Ilustración 25, se puede visualizar las configuraciones de los parámetros ACB con valores de  $P_{ACB}$  {0.3 y 0.5} que logran alcanzar  $P_S$  superior al 90%, aunque no llegan al 95%. Además, al aumentar el valor de  $T_{ACB}$ , se observan variaciones críticas en el  $P_S$ . Por otro lado, las configuraciones restantes presentan un valor inicial bajo de  $P_{ACB}$ , inferior al 80%, y a medida que el  $T_{ACB}$  aumenta, la  $P_S$  experimenta una disminución sustancial. Este comportamiento refleja la influencia crítica de los parámetros  $P_{ACB}$  y  $T_{ACB}$  en el rendimiento del sistema cuando se utiliza un  $T_{RAO} = 1ms$ .



**Ilustración 26.** Probabilidad de acceso satisfactorio ( $P_S$ ) bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) ACB con un tráfico de 30000 UEs MTC y un  $T_{RAO} = 1ms$ .

**Fuente:** Autor

Además, para evaluar los tiempos del  $D_{95}$  con un esquema ACB y una configuración de  $T_{RAO}=1ms$ . En la Ilustración 27, se presentan los tiempos del  $D_{95}$  para escenarios con cargas altas de tráfico. En estos resultados se observa que las configuraciones con  $P_{ACB}$  {0.1, 0.3, 0.5}, mantienen casi constante al  $D_{95}$ , al incrementar el valor de  $T_{ACB}$ . Sin embargo, al iniciar con valores bajos de  $T_{ACB}$ , se logra reducir un poco el retardo en el acceso. Por otro lado, el  $D_{95}$  con la configuración con  $P_{ACB}$  {0.9}, sigue una tendencia similar a las anteriores, pero la diferencia de esta configuración es que genera tiempos sumamente bajos con respecto a las demás configuraciones.



**Ilustración 27.** Retardo en el Acceso ( $D_{95}$ ) bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) ACB con un tráfico de 30000 UEs MTC y un  $T_{RAO} = 5$  ms.

**Fuente:** Autor

#### 4.3.4 Análisis (30000 UEs MTC): $P_S$ y $D_{95}$ óptimos ( $T_{RAO} = 5$ ms VS $T_{RAO} = 1$ ms)

Finalmente, para encontrar la configuración óptima de los parámetros ACB que den como resultado una probabilidad  $P_S \geq 0.95$  y un tiempo óptimo en el  $D_{95}$ , en esta sección, se compara y se evalúa las métricas de rendimiento más destacadas de cada periodicidad, es decir, se busca las mejores probabilidades de acceso satisfactorio que generen tiempos bajos en el  $D_{95}$ . Además, en esta sección se identifican los parámetros óptimos del esquema ACB ( $P_{ACB}$  y  $T_{ACB}$ ), que generen los resultados previamente mencionados. A continuación, en la Tabla 20, se visualizan los resultados óptimos ( $P_S$  y  $D_{95}$ ) de cada periodicidad (1ms, 5ms), teniendo en cuenta una  $P_S$  mayor o igual a 0.95 y considerando el menor tiempo en el  $D_{95}$ .

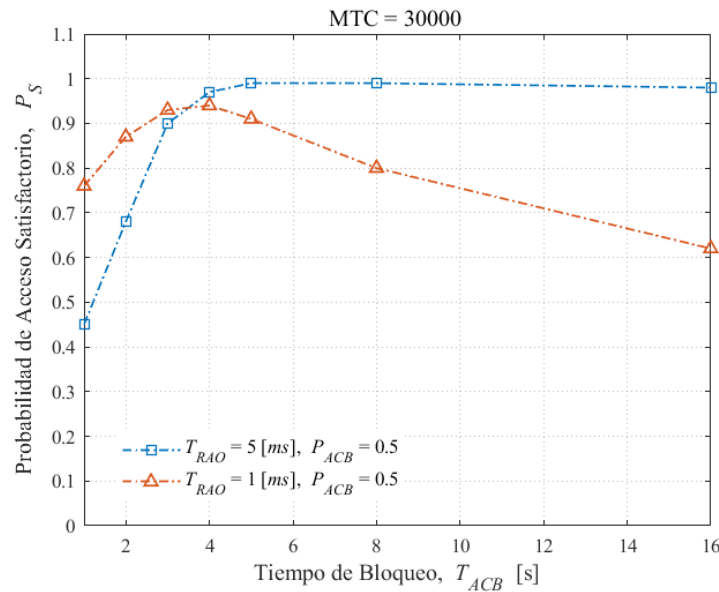
**Tabla 20.** Resultados óptimos de la  $P_S$  y del  $D_{95}$  bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ ) ACB con una carga alta de tráfico de 30000 UEs MTC y dos  $T_{RAO}$  de 5 ms y 1 ms.

**Fuente:** Autor

Dispositivos MTC	$T_{RAO}$ [ms]	$P_{ACB}$	$T_{ACB}$ [s]	$P_S$	$D_{95}$ [ms]
30000	5	0.5	4	0.97	15744.80
30000	1	0.5	4	0.94	11905.90

Como se indica en la Tabla 20, los resultados para una periodicidad de  $T_{RAO} = 5$  ms, con una configuración de  $P_{ACB} = 0.5$  y  $T_{ACB} = 4$ s, da como resultado una  $P_S = 0.97$  con un tiempo de 15744.80ms ( $D_{95} \approx 16$  segundo). Por otra parte, para una periodicidad de  $T_{RAO} = 1$  ms, con una configuración de  $P_{ACB} = 0.5$  y  $T_{ACB} = 4$ s, da como resultado una  $P_S = 0.94$  con un tiempo de 11905.90ms ( $D_{95} \approx 12$  segundo). Sin embargo, los resultados para una periodicidad de 1ms, indica que su  $P_S$  no supera el 95%. Por lo tanto, para comprobar que dichos los resultados sean precisos para ambas periodicidades, en la siguiente sección, se realizara un análisis estadístico, de las métricas de rendimiento para determinar la veracidad de los resultados obtenidos.

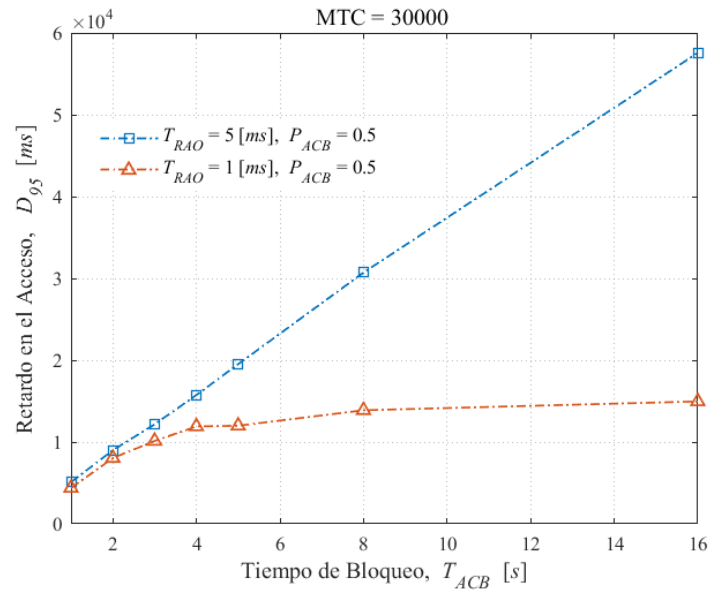
Por consiguiente, en esta sección se determina que la configuración óptima de los parámetros del esquema ACB es  $P_{ACB} = 0.5$  y  $T_{ACB} = 4s$ , con una periodicidad de  $T_{RAO} = 5ms$ , Donde dichas configuraciones, ayudan a evitar la congestión en el RACH cuando múltiples UEs MTC intentan acceder a la eNB de manera simultánea. También, en la Ilustración 28, se representa las tendencias de la  $P_S$  para cada periodicidad, donde se visualiza que la  $P_S$  que tiene una periodicidad de 5ms se mantiene óptimo mientras se incrementa el  $T_{ACB}$ . Por otro lado, la  $P_S$  que tiene una periodicidad de 1ms, cuando empieza el  $T_{ACB}$  a incrementar desde los 4 segundos, la  $P_S$  tiende a caer críticamente.



**Ilustración 28.** Comparación de la  $P_S$  con tiempos óptimos en el  $D_{95}$  ( $T_{RAO}$ : 5ms VS 1ms) bajo el ajuste de los parámetros ACB y con una carga alta de tráfico de 30000 UEs MTC

**Fuente:** Autor

En la siguiente gráfica, se visualizan los mejores tiempos del  $D_{95}$ , para ambas periodicidades. La tendencia del tiempo del  $D_{95}$  para una periodicidad de 5ms, va incrementando cuando se aumenta el  $T_{ACB}$ , por otro lado, el tiempo del  $D_{95}$  con una periodicidad de 1ms, dicho tiempo se mantiene mientras se incrementa el tiempo de bloqueo, en conclusión, los tiempos que involucran una periodicidad de 1ms brinda mejores tiempos, pero la desventaja de esta configuración es que las probabilidades de accesos satisfactorio, no superan el 95%.



**Ilustración 29.** Comparación de los tiempos óptimos del  $D_{95}$  ( $T_{RAO}$ : 5ms VS 1ms) bajo el ajuste de los parámetros ACB y con una carga alta de tráfico de 30000 UEs MTC

**Fuente:** Autor



#### 4.4 Análisis Estadístico de los Resultados de la $P_S$ y $D_{95}$

Para el presente análisis, se utilizó el escenario de tráfico más crítico sugerido por el estándar 3GPP, este escenario involucra 30000 UEs MTC. Luego, se establecieron 2 configuraciones clave: la periodicidad en el RACH ( $T_{RAO}$ ) y los parámetros del esquema de control de congestión ACB ( $P_{ACB}$  y  $T_{ACB}$ ). Estos dos parámetros de configuración, nos permite encontrar la probabilidad de acceso satisfactorio ( $P_S$ ) y el tiempo en el retardo ( $D_{95}$ ). Por lo cual, para este análisis estadístico, se considera los resultados de la  $P_S$  mayores a 0.95 con tiempos bajos en los  $D_{95}$  y con configuraciones de  $T_{RAO}=1ms$  y un  $T_{RAO}=5ms$ . A continuación, en la siguiente tabla se detallan los datos más relevantes para el presente análisis.

**Tabla 21.** Resultados óptimos de la  $P_S$  y del  $D_{95}$  con  $T_{RAO}=1ms$  y  $T_{RAO}=5ms$  en escenarios de tráfico masivo.

**Fuente:** Autor

Dispositivos MTC	$T_{RAO}$ [ms]	$P_{ACB}$	$T_{ACB}$ [s]	$P_S$	$D_{95}$ [ms]
30000	5	0.5	4	0.97	15744.8
30000	1	0.5	4	0.94	11905.9

Cuando se ha establecido los resultados óptimos para la  $P_S$  y el tiempo de  $D_{95}$ , con configuraciones de  $T_{RAO}$ ,  $P_{ACB}$  y  $T_{ACB}$ , se procede a realizar 100 simulaciones para cada valor de  $T_{RAO}$ . Estas simulaciones generaran 100 datos individuales para cada configuración de  $T_{RAO}$  (Tabla 22). Luego, las muestras obtenidas, deben pasar por una prueba estadística de normalidad.

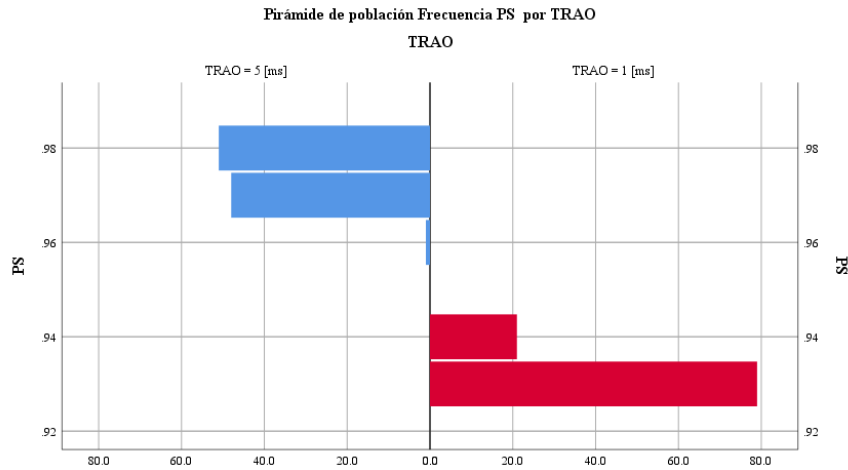
**Tabla 22.** Procesamiento de los datos para la  $P_S$  ( $P_{ACB}=0.5$ ,  $T_{ACB}=4s$ ) y  $D_{95}$  con un  $T_{RAO}=1ms$  y un  $T_{RAO}=5ms$  para escenarios con tráfico masivos.

**Fuente:** Autor

Resumen de procesamiento de casos							
	TRAO	Casos					
		Válido		Perdidos		Total	
		N. Simulaciones	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
PS	TRAO = 1 [ms]	100	100.0%	0	0.0%	100	100.0%
	TRAO = 5 [ms]	100	100.0%	0	0.0%	100	100.0%
D95	TRAO = 1 [ms]	100	100.0%	0	0.0%	100	100.0%
	TRAO = 5 [ms]	100	100.0%	0	0.0%	100	100.0%

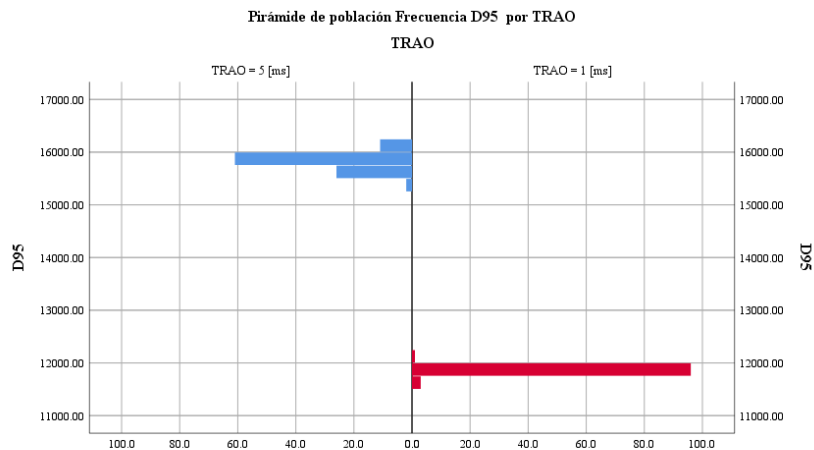
La realización de esta prueba tiene un doble propósito: en primer lugar, permite comprender la distribución de los datos recopilados y, en segundo lugar, sirve para identificar qué tipo de análisis estadístico es más apropiado para la evaluación de las hipótesis de la presente investigación. En las siguientes ilustraciones, se muestran gráficamente los resultados ( $P_S$ ,  $D_{95}$ ) de las 100 simulaciones para cada periodicidad. En la Ilustración 30, se muestra el recuento de los resultados de la  $P_S$  que se ha obtenido

como resultado de cada simulación. También en la Ilustración 31, se muestra el recuento de los resultados del  $D_{95}$  que se ha obtenido de las mismas simulaciones mencionadas. Por último, es importante mencionar que los resultados procesados, son del ajuste óptimo de los parámetros ACB.



**Ilustración 30.** Comparación del histograma de frecuencia:  $P_s$  óptimo bajo el ajuste de los parámetros ACB con un tráfico de 30000 UEs MTC y dos  $T_{RAO}$  (1 ms vs 5 ms).

**Fuente:** Autor



**Ilustración 31.** Comparación del histograma de frecuencia:  $D_{95}$  bajo el ajuste óptimo de los parámetros ACB con un tráfico de 30000 UEs MTC y dos  $T_{RAO}$  (1 ms vs 5 ms).

**Fuente:** Autor

#### 4.4.1 Prueba de Normalidad para la $P_s$ y $D_{95}$

El propósito fundamental de la prueba de normalidad en el presente proyecto de investigación radica en la evaluación de la distribución de las muestras obtenidas. Este análisis es esencial para determinar si los datos de este estudio siguen una distribución normal, lo que implica la implementación de un modelo estadístico paramétrico. De lo contrario, cuando los datos obtenidos no prosiguen una distribución normal, se requiere un enfoque estadístico no paramétrico.

Para llevar a cabo la prueba de normalidad, existen dos análisis comunes: la prueba de Kolmogorov-Smirnov, que se utiliza para más de 50 muestras, y la prueba de Shapiro-Wilk, para muestras menores a 50 observaciones. Para el presente proyecto, la prueba de Kolmogorov-Smirnov se considera apropiada debido a que el tamaño de la muestra del presente proyecto supera las 50 observaciones, (muestras: 100 simulaciones de la  $P_S$  y  $D_{95}$  con  $T_{RAO}=1ms$  y 100 simulaciones de la  $P_S$  y  $D_{95}$  con  $T_{RAO}=5ms$ ). Una vez aplicada la prueba de normalidad, se obtiene un valor estadístico conocido como el p-valor. El p-valor sirve para medir la probabilidad de observar los datos de la muestra, bajo la suposición de que la población subyacente sigue una distribución normal. Un p-valor bajo el nivel de significancia ( $p\text{-valor}<0.05$ ), indica que los datos no siguen una distribución normal (No paramétrico), es decir, se rechaza la hipótesis nula de normalidad. Caso contrario, un  $p\text{-valor}>0.05$ , acepta la hipótesis nula de normalidad (paramétrico). Este p-valor desempeña un rol fundamental en la toma de decisiones estadísticas, permitiendo identificar si los datos de la  $P_S$  y de  $D_{95}$  siguen una distribución normal o no, lo que resulta esencial para garantizar la validez de los análisis estadísticos posteriores de la presente investigación.

- Prueba de Normalidad para la  $P_S$

Luego de realizar la prueba de normalidad de la probabilidad de acceso satisfactorio ( $P_S$ ) mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov, los resultados obtenidos revelan que el p-valor obtenido para la  $P_S$  con un  $T_{RAO}$  de 1ms es igual a 0, lo que indica que el p-valor es menor a 0.05. Del mismo modo, para la  $P_S$  con un  $T_{RAO}$  de 5ms, el p-valor también es igual a 0, por lo tanto, este resultado es menor a 0.05. Estos resultados obtenidos indican que los datos de la  $P_S$  no siguen una distribución normal. En consecuencia, se procederá a realizar un análisis no paramétrico.

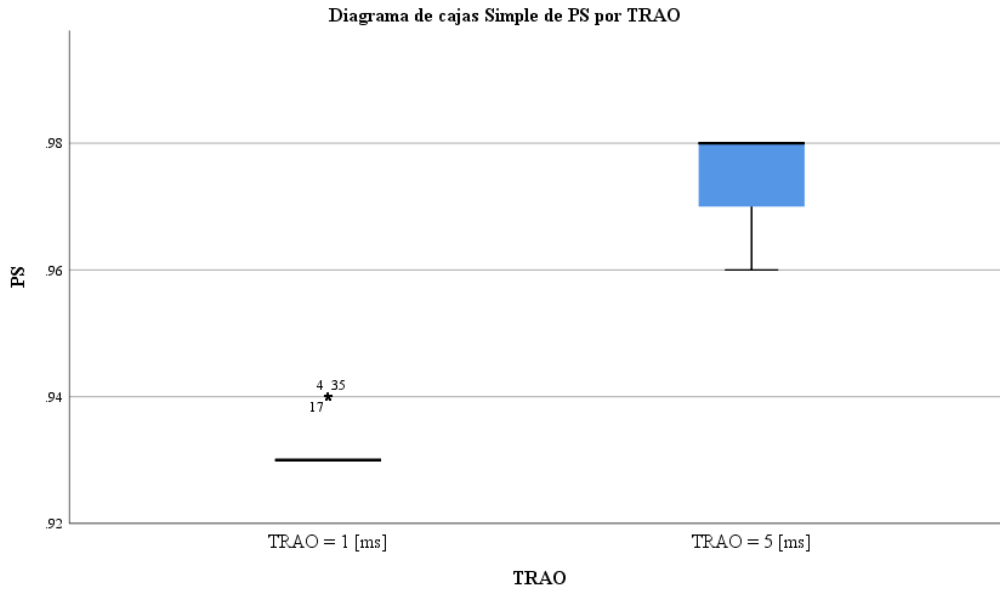
**Tabla 23.** Prueba de Normalidad de la  $P_S$  ( $P_{ACB}=0.5$ ,  $T_{ACB}=4s$ ) con un  $T_{RAO}=1ms$  y un  $T_{RAO}=5ms$  para escenarios con tráfico masivos.

**Fuente:** Autor

<b><math>P_{ACB}=0.5</math>, <math>T_{ACB}=0.4</math></b>							
	TRAO	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
PS	TRAO = 1 [ms]	.486	100	.000	.500	100	.000
	TRAO = 5 [ms]	.341	100	.000	.672	100	.000

En la Ilustración 32, se muestra los resultados de los diagramas de caja de la  $P_S$  bajo diferentes periodicidades ( $T_{RAO}$ : 1ms y 5ms). Los resultados para una  $P_S$  con periodicidad de 1 ms, muestra que no existe dispersión de los 100 datos procesados, es decir, sus datos se concentran en una  $P_S=0.93$ , sin embargo, existen pocos datos atípicos (posición: 4, 17, 35) que resultan un  $P_S=0.94$ . Por otro lado, Los resultados para una  $P_S$  con periodicidad de 5 ms, muestra que existe poca dispersión de los 100 datos procesados, dicho de otra manera, sus datos se concentran en una  $P_S$  {0.97, 0.98}, también en este resultado se muestra que existe un mínimo de  $P_S=0.96$ . Como se observó en la Ilustración 32 ambos resultados, presentan considerables diferencias.

Por lo tanto, para el presente proyecto se determina que el  $P_5$  con una periodicidad de 5 ms tiene mayor dispersión de sus resultados, pero cabe mencionar que dicha dispersión no es tan significativa, también, se determina que el valor mínimo de la  $P_5$  con una periodicidad de 5ms, es mucho mayor al  $P_5$  máximo con periodicidad de 1ms.



**Ilustración 32.** Diagrama de cajas:  $P_5$  bajo el ajuste óptimo de los parámetros ACB con un tráfico de 30000 UEs MTC y dos  $T_{RAO}$  (1 ms vs 5 ms).

**Fuente:** Autor

- Prueba de Normalidad para la  $D_{95}$

Después de llevar a cabo la prueba de normalidad del retardo en el acceso ( $D_{95}$ ) utilizando la prueba de Kolmogorov-Smirnov, se obtuvieron los siguientes resultados: el p-valor para la  $D_{95}$  con un  $T_{RAO}$  de 1ms es de 0.20 y el p-valor para la  $D_{95}$  con un  $T_{RAO}$  de 5ms, también es de 0.20. Estos resultados son mayores a 0.05, por lo tanto, los datos analizados de la  $D_{95}$  siguen una distribución normal. En consecuencia, se procederá a realizar un análisis paramétrico.

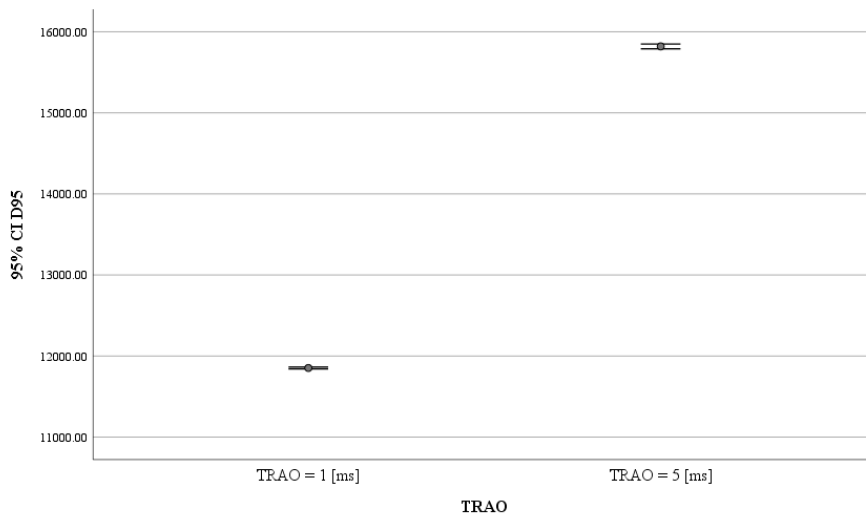
**Tabla 24.** Prueba de normalidad del  $D_{95}$  ( $P_{ACB}=0.5$ ,  $T_{ACB}=4s$ ) con un  $T_{RAO}=1ms$  y un  $T_{RAO}=5ms$  para escenarios con tráfico masivos.

**Fuente:** Autor

P <sub>ACB</sub> =0.5, T <sub>ACB</sub> =0.4							
	TRAO	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
D <sub>95</sub>	TRAO = 1 [ms]	.068	100	.200	.993	100	.876
	TRAO = 5 [ms]	.058	100	.200	.995	100	.962

A continuación, en la Ilustración 33, se presenta los resultados gráficos del intervalo de confianza (95%) de las medias estimadas del  $D_{95}$  con diferentes periodicidades. En primer lugar, se observa que los intervalos asociados a ambas periodicidades no se registran

dispersiones significativas, es decir, con un intervalo de fiabilidad del 95%, los promedios del tiempo del  $D_{95}$ , casi siempre serán las mismas para cada periodicidad. Además, se determina que las medias de los tiempos del  $D_{95}$  para cada periodicidad, son significativamente diferentes. En conclusión, los tiempos del  $D_{95}$  con una periodicidad de 1 ms, se consideran tiempos bajos para el retardo en el acceso. Sin embargo, es importante señalar que la  $P_S$  en esta configuración, su valor no alcanza al 0.95, por lo tanto, se descartan los resultados que tengan una periodicidad de 1 ms como una opción óptima.



**Ilustración 33.** Intervalo de confianza:  $D_{95}$  bajo el ajuste óptimo de los parámetros ACB con un tráfico de 30000 UEs MTC y dos  $T_{RAO}$  (1 ms vs 5 ms).

**Fuente:** Autor

#### 4.4.2 Prueba de Hipótesis para la $P_S$ y $D_{95}$

Para establecer la prueba de hipótesis de la presente investigación, se considera un nivel de significancia denominada “p-valor”, con un valor igual a 0.05. Este valor de significancia es fundamental para evaluar la evidencia a favor o en contra de la hipótesis nula ( $H_0$ ). Además, se considera los resultados previamente obtenidos de la prueba de normalidad de la  $P_S$  y el  $D_{95}$ . Los resultados de dicha prueba indicaron que para la variable  $P_S$ , se debe aplicar un estudio no paramétrico, mientras que para la variable  $D_{95}$ , se requiere un estudio paramétrico. Por consiguiente, para realizar la prueba de hipótesis, se utilizan los siguientes análisis: para los datos de la  $P_S$ , se emplea la prueba de U de Mann-Whitney, y para los datos de  $D_{95}$ , se utiliza la prueba T de Student. Estos análisis estadísticos son procesados en el software de análisis estadístico IBM SPSS, que proporciona las herramientas necesarias para la evaluación de la hipótesis. Finalmente, la toma de decisión se basará en el p-valor obtenido en cada uno de estos análisis, lo que permitirá establecer si se rechaza o no la hipótesis nula.

- **Planteamiento de la Prueba de Hipótesis para la  $P_S$**

- **$H_0$ :**  $P_S(T_{RAO} = 5ms) = P_S(T_{RAO} = 1ms)$

- La probabilidad de acceso satisfactorio con un  $T_{RAO}=5ms$  es **igual** a la probabilidad de acceso satisfactorio con un  $T_{RAO}=1ms$ .
- **H<sub>1</sub>**:  $P_S(T_{RAO} = 5ms) \neq P_S(T_{RAO} = 1ms)$ 
  - La probabilidad de acceso satisfactorio con un  $T_{RAO}=5ms$  es **diferente** a la probabilidad de acceso satisfactorio con un  $T_{RAO}=1ms$ .
- Estadístico de Prueba:
  - U de Mann-Whitney

La prueba de U de Mann-Whitney es un procedimiento estadístico no paramétrico que compara dos muestras independientes, evaluando si existe una diferencia significativa entre ellas. Esta prueba funciona asignando rangos a los datos de ambas muestras, luego calcula la suma de los rangos de cada una de las muestras como un estadístico  $U$  (ecuación (5)). Este estadístico se compara con los valores críticos de la distribución de  $U_{1,2}$  para determinar si la diferencia entre las muestras es estadísticamente significativa [32].

$$U_1 = n_1 * n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - R_1 \quad (3)$$

$$U_2 = n_1 * n_2 + \frac{n_2(n_2 + 1)}{2} - R_2 \quad (4)$$

$$U = \min (U_1, U_2) \quad (5)$$

Donde:

$n_1$  y  $n_2$ : Tamaño de cada muestra

$R_1$  y  $R_2$ : Suma de los rangos de cada muestra

$U_1$  y  $U_2$ : Estadísticos de prueba - mínimos

$U$ : Estadístico de prueba

- Regla de decisión:
  - Si el p – valor < 0.05, se rechaza  $H_0$  y se acepta la  $H_1$
  - Si el p – valor  $\geq$  0.05, se acepta  $H_0$  y se rechaza la  $H_1$

**Tabla 25.** Rangos del  $P_S(P_{ACB}=0.5, T_{ACB}=4s)$  con un  $T_{RAO}=1ms$  y un  $T_{RAO}=5ms$  para escenarios con tráfico masivos.

**Fuente:** Autor

Rangos				
	TRAO	N	Rango promedio	Suma de rangos
PS	1.00	100	50.50	5050.00
	5.00	100	150.50	15050.00
	Total	200		

**Tabla 26.** Resultados de la prueba de U de Mann-Whitney:  $P_S$  ( $P_{ACB}=0.5$ ,  $T_{ACB}=4s$ ) con un  $T_{RAO}=1ms$  y un  $T_{RAO}=5ms$  para escenarios con tráficos masivos.

**Fuente:** Autor

Estadísticos de prueba	
	$P_S$
U de Mann-Whitney	.000
W de Wilcoxon	5050.000
Z	-12.829
Sig. asintótica(bilateral)	.000
a. Variable de agrupación: TRAO	

**Interpretación:** Luego de llevar a cabo la prueba de U de Mann-Whitney para evaluar la probabilidad de acceso satisfactorio en función de diferentes valores de  $T_{RAO}$ , como resultado se ha obtenido un valor de p-valor igual a 0. Esto indica que el p-valor se encuentra por debajo del nivel de significancia de 0.05. Por consiguiente, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna. En conclusión, con un nivel de confianza del 95%, se puede afirmar que existe una diferencia estadísticamente significativa entre la ( $P_S$ ) con un valor de  $T_{RAO} = 5ms$  y la  $P_S$  con un valor de  $T_{RAO} = 1ms$ . Por lo tanto, se determina que la  $P_S$  con un  $T_{RAO}$  de  $5ms$  supera significativamente a la  $P_S$  con un  $T_{RAO}$  de  $1ms$ . Además, como resultado final, se concluye que la combinación de los parámetros ACB con una  $P_{ACB} = 0.5$ , un  $T_{ACB}=4s$ , y un  $T_{RAO}$  de  $5ms$ , son parámetros óptimos que permiten obtener resultado significativo ( $P_S \geq 0.95$ ) que ayudan a reducir la congestión en el RACH y brindar fiabilidad de las comunicaciones IoT en escenarios de tráfico masivo.

- **Planteamiento de la Prueba de Hipótesis para la  $D_{95}$**
- **$H_0$ :**  $D_{95}(T_{RAO} = 5ms) = D_{95}(T_{RAO} = 1ms)$ 
  - El retardo en el acceso con un  $TRAO=5ms$  es **igual** al retardo en el acceso con un  $TRAO=1ms$ .
- **$H_1$ :**  $D_{95}(T_{RAO} = 5ms) \neq D_{95}(T_{RAO} = 1ms)$ 
  - El retardo en el acceso con un  $TRAO=5ms$  es **diferente** al retardo en el acceso con un  $TRAO=1ms$ .
- Estadístico de Prueba:
  - T-Student para muestras independientes.

La prueba T- Student (ecuación (6)) para muestras independientes es una técnica estadística utilizada para comparar las medias de dos grupos diferentes y determinar si existen diferencias significativas entre ellas. Además, se basa en la diferencia de las medias de cada muestra. También, en esta prueba se debe considerar la igualdad de las

varianzas mediante la prueba de Levene, que evalúa si las varianzas son iguales. Si el valor p de la prueba es menor al 0.05, se asume que las varianzas son diferentes [33].

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)}} \quad (6)$$

Donde:

- $\bar{x}_1$  y  $\bar{x}_2$ : Valor medio de cada muestra
- $s_1^2$  y  $s_2^2$ : Desviación típica de cada muestra
- $n_1$  y  $n_2$ : Tamaño de cada muestra
- t: Estadístico de prueba

- Regla de decisión:
  - Si el p – valor < 0.05, se rechaza  $H_0$  y se acepta la  $H_1$
  - Si el p – valor  $\geq$  0.05, se acepta  $H_0$  y se rechaza la  $H_1$

**Tabla 27.** Media del  $D_{95}$  ( $P_{ACB}=0.5$ ,  $T_{ACB}=4s$ ) con un  $T_{RAO}=1ms$  y un  $T_{RAO}=5ms$  para escenarios con tráfico masivos.

**Fuente:** Autor

Estadísticas de grupo					
	TRAO	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
D95	TRAO = 1 [ms]	100	11852.9010	57.75831	5.77583
	TRAO = 5 [ms]	100	15819.5070	148.45961	14.84596

### Interpretación:

Luego de llevar a cabo la prueba de T-Student para evaluar la probabilidad del tiempo en el retardo en el acceso en función de diferentes valores de TRAO, como resultado se ha obtenido un valor de p-valor igual a 0. Esto indica que el p-valor se encuentra por debajo del nivel de significancia. Por consiguiente, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna. En consecuencia, con un nivel de confianza del 95%, se puede afirmar que existe una diferencia estadísticamente significativa entre el  $D_{95}$  con un valor de  $T_{RAO} = 5ms$  y el  $D_{95}$  con un valor de  $T_{RAO} = 1ms$ . Por lo tanto, se determina que el  $D_{95}$  con un  $T_{RAO}$  de 5ms supera al  $D_{95}$  con un  $T_{RAO}$  de 1ms.

**Tabla 28.** Resultados: Prueba T-Student para muestras independientes:  $D_{95}$  ( $P_{ACB}=0.5$ ,  $T_{ACB}=4s$ ) con un  $T_{RAO}=1ms$  y un  $T_{RAO}=5ms$  para tráfico masivos.

**Fuente:** Autor

	Prueba T para la igualdad de medias
--	-------------------------------------



		Prueba de Levene de igualdad de varianzas		t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
		F	Sig.						Inferior	Superior
D95	Se asumen varianzas iguales	48.785	.000	-249.00	198	.000	-3966.60	15.92	-3998.02	-3935.19
	No se asumen varianzas iguales			-249.00	128.29	.000	-3966.60	15.92	-3998.12	-3935.08

Como resultado final se ha determinado que la probabilidad de acceso satisfactorio con una configuración de parámetros  $P_{ACB}=0.5$ ,  $T_{ACB}=4s$  y  $T_{RAO}=5ms$ , da como resultado un  $P_S$  superior al 0.95, sin embargo, el tiempo del retardo en el acceso (15744.8 ms) para esta configuración mencionada es un poco elevada. Por otro lado, la configuración con  $P_{ACB}=0.5$ ,  $T_{ACB}=4s$  y  $T_{RAO}=1ms$ , el valor de la  $P_S$  no supera los 0.95, pero el tiempo en el  $D_{95}$  (11905.9 ms), es mucho menor con respecto a la primera configuración, por lo tanto, se determina que la configuración con  $P_{ACB}=0.5$ ,  $T_{ACB}=4s$  y  $T_{RAO}=5ms$  brinda un  $P_S$  mayor a 0.95, por lo tanto, estos resultados son óptimo para reducir las congestiones que se generan el RACH cuando múltiples dispositivos MTC intentan acceder simultáneamente a la eNB brindando fiabilidad en el acceso a la red.

## 5. CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

- En esta investigación, se analizó el esquema de control de congestión ACB como una estrategia para minimizar las congestiones que se generan en el RACH, cuando diferentes dispositivos MTC intentan acceder a la eNB de manera simultánea en escenarios que demandan cargas de tráfico bajos, medios y altos. Además, mediante el análisis estadístico, se evaluó el impacto que genera la variación de parámetros ACB, como la probabilidad de bloqueo  $P_{ACB}$  y el tiempo de bloqueo  $T_{ACB}$  con relación a la periodicidad de RAOs. También se consideró a la probabilidad de acceso satisfactorio ( $P_S$ ) como métrica de rendimiento principal para este proyecto. En consecuencia, se priorizó la optimización de los parámetros ACB para garantizar la confiabilidad de las comunicaciones IoT considerando las configuraciones de  $T_{RAO}$ . Seguidamente, se identificaron los retardos en el acceso ( $D_{95}$ ) y se determinó el rango óptimo de parámetros ACB para cada escenario de tráfico, con el fin de establecer comunicaciones IoT fiables con un control de congestión eficiente en el RACH principalmente en escenarios de tráfico masivo.
- Para los escenarios de tráfico bajo y medio con 5000 y 15000 dispositivos MTC, respectivamente, las periodicidades  $T_{RAO} = \{1, 5\}$  ms resultan adecuadas para ambos escenarios. Las dos periodicidades logran obtener una  $P_S \geq 0.95$ , con amplias configuraciones de los parámetros ACB. Esto respalda la adaptabilidad del esquema ACB en estas situaciones de tráfico bajo y medio. Por otro lado, en escenarios de tráfico masivo con 30000 dispositivos MTC, la configuración de periodicidad  $T_{RAO} = 5$  ms demuestra ser más efectiva, alcanzando un  $P_S \geq 0.95$ . Sin embargo, una periodicidad igual a  $T_{RAO}=1$ ms, no logra alcanzar una  $P_S \geq 0.95$ ; además, las combinaciones de los parámetros ACB son limitadas para esta periodicidad. Por consiguiente, se concluye que la configuración de  $T_{RAO} = 1$  ms, no es recomendable utilizar en escenarios de tráfico masivo. Por último, se observó que el modelo de tráfico masivo que no tuvo un esquema de restricción ACB, los dispositivos MTC causaron ráfagas de acceso que provocaron una congestión severa en la estación base. No obstante, la implementación y el ajuste de los parámetros ACB, permitieron distribuir las llegadas de los dispositivos MTC, y a su vez, alivianaron la congestión en el RACH.
- En cuanto al retardo basado en el percentil  $D_{95}$  de los escenarios con tráfico bajo y alto con periodicidades de 5ms y 1ms, son prácticamente similares, es decir, los tiempos más bajos del  $D_{95}$  para ambos tráfico, comparten un promedio de 1000 hasta 1100 ms. En cambio, para los tráfico masivos con periodicidad de  $T_{RAO}=5$ ms, se identificó una configuración de parámetros ACB con  $P_{ACB}=0.5$  y  $T_{ACB}=4$ s, que dan como resultado un tiempo  $D_{95} = 15744.8$  ms. Asimismo, para una periodicidad de  $T_{RAO}=1$ ms, se encontró una configuración de parámetros ACB con  $P_{ACB}=0.5$  y  $T_{ACB}=4$ s que arroja un tiempo de 11905.9 ms. Sin embargo, en el caso de  $T_{RAO}=1$ ms, ninguna

configuración de ACB logra alcanzar un valor de  $PS$  superior a 0.95. Por ende, se concluye que para escenarios con tráficos masivos con una periodicidad de  $T_{RAO}=5ms$  y un ajuste adecuado de los parámetros ACB, se logra reducir la congestión en el RACH cuando intentan acceder simultáneamente los dispositivos MTC. Por último, esta configuración mencionada, resulta una solución eficiente para mejorar el rendimiento y la fiabilidad en las comunicaciones IoT.

## 5.2 Recomendaciones

- Se recomienda implementar los parámetros del esquema de control de congestión ACB en entornos de tráfico masivo para distribuir de manera eficiente las llegadas de dispositivos MTC y aliviar la congestión que se genera en el RACH. Esta estrategia se ha demostrado como una solución eficaz para mejorar el rendimiento y la confiabilidad en las comunicaciones IoT en escenarios con tráfico masivo.
- También se recomienda realizar un análisis exhaustivo de las configuraciones adicionales de parámetros ACB, como diferentes valores de PACB y TACB. Esto permitiría identificar configuraciones óptimas que no solo optimicen la probabilidad de acceso satisfactorio ( $PS$ ) sino también minimicen el retardo en el acceso ( $D_{95}$ ) en escenarios de tráfico masivo.
- Para mejorar aún más el rendimiento en el acceso de dispositivos MTC a la eNB en las comunicaciones IoT con tráfico masivo, se recomienda implementar estrategias de gestión de recursos que permitan asignar recursos de manera más eficiente. Estas estrategias pueden incluir la priorización de dispositivos MTC según su importancia. Esto ayudará a evitar congestiones innecesarias y garantizará una distribución equitativa de los recursos del RACH.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] N. M. Balasubramanya, L. Lampe, G. Vos, and S. Bennett, “DRX with Quick Sleeping: A Novel Mechanism for Energy-Efficient IoT Using LTE/LTE-A,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 3, no. 3, pp. 398–407, 2019, doi: 10.1109/JIOT.2016.2527022.
- [2] H. Qian, “An Improved Approach for Reader Anti-Collision in Industrial Internet of Things,” *Secur. Commun. Networks*, vol. 1, p. 6, 2022, doi: 10.1155/2022/1268577.
- [3] J. Cao, H. Li, M. Ma, and F. Li, “UPPGA: Uniform Privacy Preservation Group Handover Authentication Mechanism for mMTC in LTE-A Networks,” *Secur. Commun. Networks*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/6854612.
- [4] C. Bockelmann *et al.*, “Massive machine-type communications in 5g: Physical and MAC-layer solutions,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 9, pp. 59–65, 2018, doi: 10.1109/MCOM.2016.7565189.
- [5] 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, doi: 10.1109/TVT.2017.2776868.
- [6] R. G. Cheng, Z. Becvar, Y. S. Huang, G. Bianchi, and R. Harwahu, “Two-phase random access procedure for LTE-A Networks,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 18, no. 4, pp. 2374–2387, 2019, doi: 10.1109/TWC.2019.2903479.
- [7] R. J. Montesinos Chano, “Estudio y Análisis de Tecnologías Habilitadoras 5G y Sus Factibilidades para el Desarrollo del Internet de las Cosas,” Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2018.
- [8] I. Leyva Mayorga, M. A. Rodriguez Hernandez, V. Pla, J. Martinez Bauset, and L. Tello Oquendo, “Adaptive access class barring for efficient mMTC,” *Comput. Networks*, vol. 149, pp. 252–264, 2019, doi: 10.1016/j.comnet.2018.12.003.
- [9] 3GPP, “Protocol specification (3GPP TS 36.331 version 15.3.0 Release 15),” 2018. doi: RTS/TSGR-0236331vf30.
- [10] L. Chu Heng, K. Shang Juh, and C. Fu Min, “LSTM-based ACB scheme for machine type communications in LTE-A networks,” *Comput. Commun.*, vol. 152, no. July 2019, pp. 296–304, 2020, doi: 10.1016/j.comcom.2020.01.047.
- [11] M. Alvi, K. M. Abualnaja, W. Tariq Toor, and M. Saadi, “Performance analysis of access class barring for next generation IoT devices,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 60, no. 1, pp. 615–627, 2021, doi: 10.1016/j.aej.2020.09.055.
- [12] C. Wan and J. Sun, “Access class barring parameter adaptation based on load estimation model for mMTC in LTE-A,” *Proc. - 2019 Int. Conf. Commun. Inf. Syst. Comput. Eng. CISCE 2019*, vol. 7, pp. 512–515, 2019, doi: 10.1109/CISCE.2019.00119.
- [13] D. C. Yaccirema Vargas, “Arquitectura de Interoperabilidad de dispositivos Físicos

- para el Internet de las Cosas (IoT),” Universitat Politècnica de València, València, España, 2019. doi: 10.4995/Thesis/10251/129858.
- [14] M. Quiñones Cuenca, H. P. Pachar Bravo, J. Martínez Curipoma, and L. Q. Rommel Torres, “Developing and evaluation of an IoT mobile gateway for 4G LTE networks,” *Enfoque, Ute*, vol. 11, no. 4, pp. 16–26, 2020, doi: 10.29019/enfoque.v11n4.634.
- [15] J. Sachs, P. Popovski, A. Höglund, D. Gozalvez-serrano, and P. Fertl, “Machine - Type Communications,” in *5G Mobile and Wireless Communications Technology*, A. Osseiran, J. Monserrat, and P. Marsch, Eds., Reino Unido: Cambridge University Press, 2018, p. 30. doi: 10.1017/CBO9781316417744.005.
- [16] N. Mysore Balasubramanya, “Enhancements to the Long Term Evolution (LTE) Standard for Facilitating the Internet of Things (IoT),” The University Of British Columbia, 2017. doi: 10.14288/1.0347534.
- [17] F. Wang and G. Ma, “Introduction on Massive Machine-Type Communications (mMTC),” in *Massive Machine Type Communications: Multiple Access Schemes*, Springer, 2019, pp. 1–3. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/10059>
- [18] M. E. Morocho Cayamcela, H. Lee, and W. Lim, “Machine learning for 5G/B5G mobile and wireless communications: Potential, limitations, and future directions,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 137184–137206, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2942390.
- [19] S. Márquez Torres, “Perspectivas Regulatorias y Económicas de las Comunicaciones Tipo Máquina en el Contexto del Avance Tecnológico en Materia de Telecomunicaciones y el Internet de las Cosas,” Infotec, Ciudad de México, México, 2019.
- [20] G. Lacalle Marcos, “Evaluación e implementación de LTE-A/5G-NR para aplicaciones industriales Time-Critical,” Universidad de Oviedo, 2020. doi: <http://hdl.handle.net/10651/56216>.
- [21] P. Chiara, “Channel Access in Wireless Networks: Protocol Design of Energy-Aware Schemes for the IoT,” University of Padova, 2018. doi: <https://hdl.handle.net/11577/3427305>.
- [22] S. M. Sinche Minchalo, “Diseño y análisis del canal de acceso aleatorio en redes IoT Celular para compensar la antigüedad de la información en escenarios de comunicaciones masivas,” Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2021. [Online]. Available: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/53645>
- [23] C. C. Tseng, H. C. Wang, J. R. Chang, L. H. Wang, and F. C. Kuo, “Design of Two-Step Random Access Procedure for URLLC Applications,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 121, no. 2, pp. 1187–1219, 2021, doi: 10.1007/s11277-021-09060-4.
- [24] D. Segura, E. J. Khatib, and R. Barco, “Evaluation of Mobile Network Slicing in a Logistics Distribution Center,” *Comput. Sci.*, vol. 1, pp. 1–12, 2022, doi: 10.48550/arXiv.2212.12482.
- [25] D. Segura, E. J. Khatib, and R. Barco, “Evaluation of Mobile Network Slicing in a

- Logistics Distribution Center,” *Comput. Sci.*, vol. 1, pp. 1–12, 2022, doi: 10.48550/arXiv.2212.12482.
- [26] A. T. H. Bui and A. T. Pham, “Deep Reinforcement Learning-Based Access Class Barring for Energy-Efficient mMTC Random Access in LTE Networks,” *IEEE Access*, vol. 8, no. 4, pp. 227657–227666, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3045811.
- [27] L. Tello-Oquendo, D. Pacheco-Paramo, V. Pla, and J. Martinez-Bauset, “Reinforcement learning-based ACB in LTE-A networks for handling massive M2M and H2H communications,” *IEEE Int. Conf. Commun.*, vol. 2018-May, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1109/ICC.2018.8422167.
- [28] 3GPP, “Quality improvements for TS22.011 Release 19,” 2023.
- [29] G. Mahamadou, M. Jérôme, A. Kora, and C. Lishou, “Advanced Access Class Barring For Massive IoT Deployment Over LTE-A Networks,” *Asian J. Sci. Technol.*, vol. 11, no. 1, pp. 10644–10653, 2020.
- [30] 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, pp. 1–14, 2019, doi: 10.1016/j.adhoc.2019.101939.
- [31] J. R. Vidal, L. Tello Oquendo, V. Pla, and L. Guijarro, “Performance Study and Enhancement of Access Barring for Massive Machine-Type Communications,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 63745–63759, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2917618.
- [32] A. Quispe Andía, K. Calla Vasquez, J. Yangali Vicente, J. Rodríguez López, and I. Pumacayo Palominio, *Estadística no paramétrica aplicada a la investigación científica con software SPSS, Minitab y Excel*. Colombia, 2019.
- [33] J. G. Lugo Armenta and L. R. Pino Fan, “Inferential Reasoning Levels for t-Student Statistical,” *Bolema - Math. Educ. Bull.*, vol. 35, no. 71, pp. 1776–1802, 2021, doi: 10.1590/1980-4415V35N71A25.

## ANEXOS

- **Presupuesto**

**Tabla 29.** Presupuesto del Proyecto de Investigación.

*Fuente:* Autor

ÍTEM	CANTIDAD	PRECIO X UNIDAD	TOTAL	COMPONENTES	DESCRIPCIÓN
1	1	\$ 55.00	\$ 55.00	Matlab	Versión: For Student
2	1	\$ 20.00	\$ 20.00	Fotocopias	Impresión de documentos
3	1	\$ 50.00	\$ 50.00	Disco Sólido	Almacenamiento de: 500 GB
4	1	\$ 40.00	\$ 40.00	Add-Ons	Complementos para Matlab
<b>Total</b>				<b>\$ 165.00</b>	

- **Resultados generales de la probabilidad de acceso satisfactorio con un  $T_{RAO} = 5ms$  y tráfico de 5000, 15000 y 30000 dispositivos MTC**

**Tabla 30.** Resultados Generales:  $P_S$  y  $D_{95}$  bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ )

ACB con un tráfico de 5000 UEs MTC y un  $T_{RAO} = 5 ms$ .

*Fuente:* Autor

Dispositivos MTC	$P_{ACB}$	$T_{ACB}$ [s]	$P_S$	$D_{95}$ [ms]	$P_{ACB}$	$T_{ACB}$ [s]	$P_S$	$D_{95}$ [ms]
5000	0.1	1	1	28359	0.5	1	1	4009
5000	0.1	2	0.99	54394.9	0.5	2	1	7854
5000	0.1	3	0.96	71514	0.5	3	1	11959
5000	0.1	4	0.91	78534.2	0.5	4	1	15244
5000	0.1	5	0.87	82449.9	0.5	5	1	20124
5000	0.1	8	0.73	85959.3	0.5	8	1	32294
5000	0.1	16	0.49	87992	0.5	16	0.99	57205.8
5000	0.3	1	1	8044	0.9	1	1	1099.8
5000	0.3	2	1	16129	0.9	2	1	2046
5000	0.3	3	1	23889	0.9	3	1	2974
5000	0.3	4	1	32969	0.9	4	1	4039
5000	0.3	5	1	37759.1	0.9	5	1	5269
5000	0.3	8	0.99	57042.1	0.9	8	1	8034.5
5000	0.3	16	0.9	78719.9	0.9	16	1	16534

**Tabla 31. Resultados Generales:  $P_S$  y  $D_{95}$  bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ )  
ACB con un tráfico de 15000 UEs MTC y un  $T_{RAO} = 5$  ms.**

**Fuente: Autor**

Dispositivos MTC	$P_{ACB}$	$T_{ACB}$ [s]	$P_S$	$D_{95}[ms]$	$P_{ACB}$	$T_{ACB}$ [s]	$P_S$	$D_{95}[ms]$
15000	0.1	1	1	29099	0.5	1	1	3942.6
15000	0.1	2	0.99	54479	0.5	2	1	7934
15000	0.1	3	0.97	70174.4	0.5	3	1	11584
15000	0.1	4	0.92	78909.8	0.5	4	1	15834.6
15000	0.1	5	0.87	82159.5	0.5	5	1	19074.5
15000	0.1	8	0.73	86079	0.5	8	1	31404.1
15000	0.1	16	0.5	88454	0.5	16	0.99	56659.8
15000	0.3	1	1	8039.5	0.9	1	0.98	1075.5
15000	0.3	2	1	16089.3	0.9	2	0.99	2122.7
15000	0.3	3	1	23784	0.9	3	1	3129.4
15000	0.3	4	1	31544	0.9	4	1	4164.2
15000	0.3	5	1	40034.8	0.9	5	1	5219.4
15000	0.3	8	0.99	58589.4	0.9	8	1	8299.9
15000	0.3	16	0.9	79764	0.9	16	1	16844.9

**Tabla 32. Resultados Generales:  $P_S$  y  $D_{95}$  bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ )  
ACB con un tráfico de 30000 UEs MTC y un  $T_{RAO} = 5$  ms.**

**Fuente: Autor**

Dispositivos MTC	$P_{ACB}$	$T_{ACB}$ [s]	$P_S$	$D_{95}[ms]$	$P_{ACB}$	$T_{ACB}$ [s]	$P_S$	$D_{95}[ms]$
30000	0.1	1	1	27629	0.5	1	0.45	5095
30000	0.1	2	0.99	53689.4	0.5	2	0.68	8999.4
30000	0.1	3	0.97	70404.1	0.5	3	0.9	12164
30000	0.1	4	0.92	77799.7	0.5	4	0.97	15744.8
30000	0.1	5	0.87	81004.5	0.5	5	0.99	19515.9
30000	0.1	8	0.73	85659.5	0.5	8	0.99	30709.8
30000	0.1	16	0.49	88494.8	0.5	16	0.98	57569.4
30000	0.3	1	0.69	9044.3	0.9	1	0.32	1186.3
30000	0.3	2	0.98	15909.9	0.9	2	0.35	2469
30000	0.3	3	1	23839	0.9	3	0.38	3704.1
30000	0.3	4	1	32419.3	0.9	4	0.4	4944.4
30000	0.3	5	1	38579.7	0.9	5	0.43	6149.4
30000	0.3	8	0.99	59254.7	0.9	8	0.44	9779
30000	0.3	16	0.9	79199.2	0.9	16	0.44	19550.2



- **Resultados generales de la probabilidad de acceso satisfactorio con un  $T_{RAO} = 1ms$  y tráficos de 5000, 15000 y 30000 dispositivos MTC**

**Tabla 33. Resultados Generales:  $P_S$  y  $D_{95}$  bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ )  
ACB con un tráfico de 5000 UEs MTC y un  $T_{RAO} = 1 ms$ .**

**Fuente: Autor**

Dispositivos MTC	$P_{ACB}$	$T_{ACB}$ [s]	$P_S$	$D_{95}$ [ms]	$P_{ACB}$	$T_{ACB}$ [s]	$P_S$	$D_{95}$ [ms]
5000	0.1	1	0.82	13694.1	0.5	1	1	3984
5000	0.1	2	0.57	14661.8	0.5	2	1	7642
5000	0.1	3	0.44	15146.5	0.5	3	0.98	10182.5
5000	0.1	4	0.38	15045.2	0.5	4	0.95	11725.8
5000	0.1	5	0.32	14862.4	0.5	5	0.91	12192.7
5000	0.1	8	0.22	15401.9	0.5	8	0.81	13697.5
5000	0.1	16	0.15	15796.6	0.5	16	0.62	14949.1
5000	0.3	1	1	7746.8	0.9	1	1	1024
5000	0.3	2	0.94	11816.1	0.9	2	1	2145.3
5000	0.3	3	0.86	13242.3	0.9	3	1	3000.6
5000	0.3	4	0.8	13848.8	0.9	4	1	4243
5000	0.3	5	0.72	14227.5	0.9	5	1	5199.1
5000	0.3	8	0.59	14962.5	0.9	8	0.99	7967.5
5000	0.3	16	0.41	15443.4	0.9	16	0.94	58.8

**Tabla 34. Resultados Generales:  $P_S$  y  $D_{95}$  bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ )  
ACB con un tráfico de 15000 UEs MTC y un  $T_{RAO} = 1 ms$ .**

**Fuente: Autor**

Dispositivos MTC	$P_{ACB}$	$T_{ACB}$ [s]	$P_S$	$D_{95}$ [ms]	$P_{ACB}$	$T_{ACB}$ [s]	$P_S$	$D_{95}$ [ms]
15000	0.1	1	0.81	13816.6	0.5	1	1	3991.1
15000	0.1	2	0.58	14765.3	0.5	2	1	7699.1
15000	0.1	3	0.45	14999.6	0.5	3	0.98	10102.1
15000	0.1	4	0.38	15007.8	0.5	4	0.95	11746.5
15000	0.1	5	0.32	15165	0.5	5	0.92	11924.3
15000	0.1	8	0.23	15498.8	0.5	8	0.8	13963.4
15000	0.1	16	0.14	15924.5	0.5	16	0.61	15007.8
15000	0.3	1	1	7735.3	0.9	1	1	1079.1
15000	0.3	2	0.95	11927	0.9	2	1	2124.7
15000	0.3	3	0.87	13331.7	0.9	3	1	3105.3
15000	0.3	4	0.79	13502.4	0.9	4	1	4183.3
15000	0.3	5	0.72	14269.9	0.9	5	1	5220.6
15000	0.3	8	0.58	14922.7	0.9	8	0.99	7969.4
15000	0.3	16	0.39	15272	0.9	16	0.94	105.3

**Tabla 35. Resultados Generales:  $P_S$  y  $D_{95}$  bajo el ajuste de los parámetros ( $P_{ACB}$ ,  $T_{ACB}$ )  
ACB con un tráfico de 30000 UEs MTC y un  $T_{RAO} = 1$  ms.**

**Fuente: Autor**

Dispositivos MTC	$P_{ACB}$	$T_{ACB}$ [s]	$P_S$	$D_{95}[ms]$	$P_{ACB}$	$T_{ACB}$ [s]	$P_S$	$D_{95}[ms]$
30000	0.1	1	0.81	13784.6	0.5	1	0.76	4381.7
30000	0.1	2	0.58	14777.4	0.5	2	0.87	8038.4
30000	0.1	3	0.46	14895	0.5	3	0.93	10130.3
30000	0.1	4	0.37	15224.6	0.5	4	0.94	11905.9
30000	0.1	5	0.31	15109.6	0.5	5	0.91	11993.7
30000	0.1	8	0.23	15650.1	0.5	8	0.8	13883.6
30000	0.1	16	0.14	15644.9	0.5	16	0.62	14962.5
30000	0.3	1	0.87	8085.5	0.9	1	0.67	1113.6
30000	0.3	2	0.94	12064.7	0.9	2	0.69	2245.2
30000	0.3	3	0.87	13173	0.9	3	0.71	3376.3
30000	0.3	4	0.79	13791.9	0.9	4	0.73	4507
30000	0.3	5	0.72	14341.3	0.9	5	0.74	5585.6
30000	0.3	8	0.58	15150.8	0.9	8	0.74	8627.9
30000	0.3	16	0.4	15380.9	0.9	16	0.69	12121.4