

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de:

Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

TRABAJO DE TITULACIÓN

**EVALUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL IMPACTO DEL TIEMPO DE *BACKOFF*
EN LA RED DE ACCESO RADIO DE IOT CELULAR CON TRÁFICO MASIVO**

Autor:

Daniel Alejandro Santander González

Tutor:

Ing. Luis Patricio Tello Oquendo, PhD.

Riobamba – Ecuador

**Año
2021**

Los miembros del tribunal de graduación del proyecto de investigación de título: **“EVALUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL IMPACTO DEL TIEMPO DE BACKOFF EN LA RED DE ACCESO RADIO DE IOT CELULAR CON TRÁFICO MASIVO”**., presentado por: **Daniel Alejandro Santander González**, dirigido por: **Luis Patricio Tello Oquendo, PhD.**

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

Para constancia de lo expuesto firman.

PhD. Leonardo Rentería
Presidente del Tribunal

Firmado digitalmente por
LEONARDO FABIAN
RENERIA
BUSTAMANTE
Fecha: 2021.09.29
15:52:44 -05'00'

.....
Firma

PhD. Yesenia Cevallos
Miembro del Tribunal

 Firmado electrónicamente por:
**YESENIA ELIZABETH
CEVALLOS
VILLACRES**

.....
Firma

MGS. Daniel Haro
Miembro del Tribunal

 Firmado electrónicamente por:
**EDUARDO DANIEL
HARO MENDOZA**

.....
Firma

DECLARACIÓN EXPRESA DE TUTORÍA

En calidad de tutor del tema de investigación “EVALUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL IMPACTO DEL TIEMPO DE BACKOFF EN LA RED DE ACCESO RADIO DE IOT CELULAR CON TRÁFICO MASIVO”, realizado por el Sr. **Daniel Alejandro Santander González**, para optar por el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, considero que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sustentada públicamente y evaluada por el jurado examinador que se designe.

Riobamba, 09 de septiembre de 2021



Digitally signed by LUIS PATRICIO TELLO
OQUENDO
DN: c=EC, serialNumber=0604235242, sn=TELLO
OQUENDO, cn=LUIS PATRICIO TELLO OQUENDO,
1.3.6.1.4.1.3742.10.4-0604235242,
givenName=LUIS PATRICIO,
email=lptello@gmail.com, st=CHIMBORAZO,
l=RIOBAMBA, ou=Certificado de Clase 2 de Persona
Física EC
Date: 2021.09.07 18:12:04 -05'00'

Luis P. Tello Oquendo, PhD.

C.I. 060423524-2

TUTOR

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

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



.....
Daniel Alejandro Santander González

C.I. 230034554-9

DEDICATORIA

“Da tu primer paso con fe, no es necesario que veas toda la escalera completa, sólo da tu primer paso”: Martin Luther King

Este proyecto va dedicado primeramente a Dios, por darme fuerza para continuar cuando me he sentido rendido y ser participe en cada proyecto de mi vida.

A mis queridos padres que, por su amor, paciencia, trabajo, sacrificio y su gran apoyo incondicional, me han motivado siempre para seguir luchando por mis sueños, y que todo sacrificio tiene su recompensa algún día.

A mis hermanos, pilares importantes de mi vida, por estar siempre presentes, con sus palabras de aliento y sus ocurrencias, que me han enseñado a nunca dudar de mis capacidades.

Daniel Santander G.

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Dios, por permitirme cumplir una de las metas más importantes de mi vida junto a mi familia.

A mis queridos padres, Vinicio Santander y Cayetana Gonzalez por brindarme su amor, su confianza, sus consejos y su gran apoyo incondicional, para hacer de mí una mejor persona, por enseñarme a no rendirme y ver siempre el lado bueno de las cosas, además por ser la motivación de cada uno de mis esfuerzos.

A mis hermanos Kevin, Katherine y Maykel que siempre han estado presentes brindándome su apoyo y palabras de fortaleza en momentos de dificultad.

A mis compañeros y amigos, Luis Z, Joel M, Edinson S, Mario C, Jorge B, Wilson L, por su amistad y apoyo durante mi trayectoria universitaria.

A mi tutor, PhD. Luis Patricio Tello O., una excelente persona, que me brindó su confianza, apoyo, asesoría, consejos, orientación, y tiempo para desarrollar el proyecto de investigación con éxito, eficacia y calidad.

A cada uno de mis docentes que impartieron con paciencia e interés sus valiosos conocimientos, valores y experiencias durante mi formación profesional, gracias por su labor.

Daniel Santander G.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
RESUMEN.....	XVII
ABSTRACT.....	XVIII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	3
1.2. OBJETIVOS.....	4
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	4
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
CAPÍTULO II	5
2. ESTADO DEL ARTE	5
2.1. ANTECEDENTES	5
2.2. CELLULAR INTERNET OF THINGS (CIoT).....	6
2.3. COMUNICACIÓN MASIVA TIPO MÁQUINA (mMTC)	7
2.4. PROCEDIMIENTO DE ACCESO ALEATORIO BASADO EN CONTENCIÓN	8
2.5. OPORTUNIDAD DE ACCESO ALEATORIO (RAO)	10
2.6. PROCEDIMIENTO DE <i>BACKOFF</i>	11
CAPÍTULO III	14
3. METODOLOGÍA.....	14
3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	14
3.2. MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN.....	14
3.2.1. MÉTODO CIENTÍFICO.....	14

3.2.2.	TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS	14
3.2.3.	INSTRUMENTOS	15
3.3.	POBLACIÓN, MUESTRA Y MÉTRICAS DE RENDIMIENTO	15
3.3.1.	POBLACIÓN	15
3.3.2.	MUESTRA.....	15
3.3.3.	MÉTRICAS DE RENDIMIENTO	16
3.3.3.1.	PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO	16
3.3.3.2.	RETARDO EN EL ACCESO	17
3.3.3.3.	NÚMERO PROMEDIO DE TRANSMISIONES DE PREÁMBULO.....	19
3.4.	OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	21
3.5.	PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS.....	22
3.5.1.	PROCEDIMIENTO	23
3.5.2.	MODELO DEL SISTEMA.....	24
3.5.3.	DIAGRAMA SECUENCIAL DEL RAP	25
3.5.4.	PASO 1 - TRANSMISIÓN DEL PREÁMBULO	25
3.5.5.	PASO 2 - RESPUESTA DE ACCESO ALEATORIO (RAR).....	26
3.5.6.	PASO 3 - SOLICITUD DE CONEXIÓN.....	27
3.5.7.	PASO 4 - RESOLUCIÓN DE CONTIENDA	28
CAPÍTULO IV	30
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
4.1.	RESULTADOS DE LAS MÉTRICAS DE RENDIMIENTO	30
4.1.1.	PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO (P_S).....	30
4.1.1.1.	RESULTADOS CON PERIODICIDAD DE RAOs DE 5 ms	30
4.1.1.2.	RESULTADOS CON PERIODICIDAD de RAOs DE 1 ms.....	34

4.1.1.3.	REPRESENTACIÓN GRÁFICA TRIDIMENSIONAL DE LA PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO EN FUNCIÓN DE LAS CONFIGURACIONES DE PERIODICIDAD DE RAOs.....	37
4.1.1.4.	COMPARATIVA DE LOS VALORES MÍNIMOS DE BI QUE CUMPLEN CON LAS CONDICIONES DE FIABILIDAD EN FUNCIÓN DE LOS VALORES DE T_{RAO}	38
4.1.1.5.	COMPARATIVA DEL TRÁFICO CRÍTICO (MTC & HTC) EN FUNCION AL TRÁFICO CRÍTICO (MTC & HTC) CON DISTINTOS VALORES DE T_{RAO}	39
4.1.2.	RETARDO EN EL ACCESO (D).....	40
4.1.2.1.	RESULTADOS CON PERIODICIDAD DE RAOs DE 5 ms	41
4.1.2.2.	RESULTADOS CON PERIODICIDAD DE RAOs DE 1 ms	42
4.1.2.3.	REPRESENTACIÓN GRÁFICA TRIDIMENSIONAL DEL RETARDO EN EL ACCESO (D) EN FUNCIÓN DE LAS CONFIGURACIONES DE PERIODICIDAD DE RAOs	44
4.1.3.	NÚMERO PROMEDIO DE TRANSMISIONES DE PREÁMBULOS (k)	45
4.1.3.1.	RESULTADOS CON PERIODICIDAD DE RAOs DE 5 ms	45
4.1.3.2.	RESULTADOS CON PERIODICIDAD DE RAOs DE 1 ms	47
4.1.3.3.	REPRESENTACIÓN GRÁFICA TRIDIMENSIONAL DEL NÚMERO PROMEDIO DE TRANSMISIONES DE PREÁMBULOS (k) EN FUNCIÓN DE LAS CONFIGURACIONES DE PERIODICIDAD DE RAOs.....	48
4.2.	COMPARATIVA DE LAS DISTINTAS MÉTRICAS DE RENDIMIENTO PARA LOS DIFERENTES ESCENARIOS EN FUNCIÓN AL RANGO DE BI ÓPTIMO DETERMINADO.....	49
4.3.	ANÁLISIS INFERENCIAL (PRUEBA DE HIPÓTESIS).....	50
4.3.1.	PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA LA VARIABLE DE PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO (P_S)	52
4.3.2.	PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA LA VARIABLE DE RETARDO EN EL ACCESO (D)	53

4.3.3.	PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA LA VARIABLE DEL NÚMERO PROMEDIO DE TRANSMISIONES DE PREÁMBULOS (k)	54
4.3.4.	DECISIÓN DE RESULTADOS.....	55
CAPÍTULO V	56
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	56
5.1.	CONCLUSIONES	56
5.2.	RECOMENDACIONES.....	57
BIBLIOGRAFÍA	58
ANEXOS	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Descripción de conectividad CIoT.	7
Figura 2. Conectividad de diversos servicios de mMTC en una misma BS.....	8
Figura 3. RAP basado en contención.....	8
Figura 4. Estructura de trama tipo 1 con diferentes configuraciones del índice de PRACH.....	11
Figura 5. Colisión en el primer paso cuando múltiples dispositivos usan el mismo preámbulo (preamble (i)) y no es decodificado, se aplica el T_{BO} para realizar un nuevo intento.....	12
Figura 6. Colisión en el tercer paso cuando múltiples dispositivos usan los mismos recursos físicos de enlace ascendente, se aplica el T_{BO} para realizar un nuevo intento.	13
Figura 7. Descripción de la población empleando la distribución Beta (3,4) y la muestra en torno a los dispositivos que lograron un acceso satisfactorio.	16
Figura 8. Descripción del retardo que se genera en el RAP basado en contención tras completar todos los pasos.	17
Figura 9. Algoritmo para la elección del percentil 95 mediante el uso del software de Matlab.	19
Figura 10. Procedimiento para análisis y obtención de resultados.	22
Figura 11. Descripción del modelo del sistema.....	24
Figura 12. Descripción del procedimiento del paso 1 en el RAP basado en contención.....	26
Figura 13. Descripción del procedimiento del paso 2 en el RAP basado en contención.....	27
Figura 14. Descripción del procedimiento del paso 3 en el RAP basado en contención.....	28
Figura 15. Descripción del procedimiento del paso 4 en el RAP basado en contención.....	29
Figura 16. Probabilidad de Acceso Satisfactorio (P_S) en base a diferentes escenarios de tráfico mMTC con distintos valores de BI (20 a 960 ms) y una configuración de $T_{RAO} = 5 ms$	30
Figura 17. Probabilidad de Acceso Satisfactorio (P_S) en base a diferentes escenarios de tráfico mMTC con distintos valores de BI (20 a 960 ms) y una configuración de $T_{RAO} = 1 ms$	34

Figura 18. Probabilidad de Acceso Satisfactorio (P_S) en función de diferentes escenarios de tráfico mMTC con distintos valores de BI (20 a 960 ms) para valores de periodicidad de RAOs establecidos en 5 ms (prach configuration index = 6) y 1 ms (prach configuration index = 14).	38
Figura 19. Comparativa de los valores de BI^* para las distintas configuraciones de periodicidad de RAOs.....	39
Figura 20. Comparativa de la probabilidad de acceso satisfactorio en función del tráfico crítico para comunicaciones MTC y HTC con distintas configuraciones de periodicidad de RAOs.	40
Figura 21. Retardo en el acceso (D) basado en el percentil 95 para los distintos escenarios de tráfico masivo cuando está configurado con un valor de $T_{RAO} = 5 ms$	41
Figura 22. Retardo en el acceso (D) basado en el percentil 95 para los distintos escenarios de tráfico masivo cuando está configurado con un valor de $T_{RAO} = 1 ms$	43
Figura 23. Representación en tres dimensiones del retardo en el acceso (D) en función de diferentes escenarios de tráfico mMTC con distintos valores de BI (20 a 960 ms). (a) Representación del retardo en el acceso cuando se emplea un valor de $T_{RAO} = 1 ms$ (b) Representación del retardo en el acceso cuando se emplea con un valor de $T_{RAO} = 5 ms$	44
Figura 24. Promedio de transmisiones de preámbulos (k) bajo distintos escenarios de tráfico mMTC cuando está configurado con un valor de $T_{RAO} = 5 ms$ y un máximo de 10 intentos de transmisión de preámbulo (k_{max})	46
Figura 25. Promedio de transmisiones de preámbulos (k) bajo distintos escenarios de tráfico mMTC cuando está configurado con un valor de $T_{RAO} = 1 ms$ y un máximo de 10 intentos de transmisión de preámbulo (k_{max})	47
Figura 26. Representación en tres dimensiones del número promedio de transmisiones de preámbulos (k) en función de diferentes escenarios de tráfico mMTC con distintos valores de BI (20 a 960 ms). (a) Representación del retardo en el acceso cuando se emplea un valor de $T_{RAO} = 5 ms$ (b) Representación del retardo en el acceso cuando se emplea un valor de $T_{RAO} = 1 ms$	49
Figura 27. Algoritmo para efectuar las pruebas de hipótesis mediante el software Matlab.	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de las variables.....	21
Tabla 2. Configuración de los parámetros de RACH	23
Tabla 3. Resultados más relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio bajo diferentes valores de BI en un escenario de tráfico de 10000 dispositivos MTC con un valor de $T_{RAO} = 5 ms$	31
Tabla 4. Resultados más relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio bajo diferentes valores de BI en un escenario de tráfico de 15000 dispositivos MTC con un valor de $T_{RAO} = 5 ms$	32
Tabla 5. Resultados más relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio bajo diferentes valores de BI en un escenario de tráfico de 20000 dispositivos MTC con un valor de $T_{RAO} = 5 ms$	32
Tabla 6. Resultados más relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio bajo diferentes valores de BI en un escenario de tráfico de 25000 dispositivos MTC con un valor de $T_{RAO} = 5 ms$	33
Tabla 7. Resultados más relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio bajo diferentes valores de BI en un escenario de tráfico de 30000 dispositivos MTC con un valor de $T_{RAO} = 5 ms$	33
Tabla 8. Resultados más relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio bajo diferentes valores de BI en un escenario de tráfico de 10000 dispositivos MTC con un valor de $T_{RAO} = 1 ms$	35
Tabla 9. Resultados más relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio bajo diferentes valores de BI en un escenario de tráfico de 15000 dispositivos MTC con un valor de $T_{RAO} = 1 ms$	35
Tabla 10. Resultados más relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio bajo diferentes valores de BI en un escenario de tráfico de 20000 dispositivos MTC con un valor de $T_{RAO} = 1 ms$	36
Tabla 11. Resultados más relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio bajo diferentes valores de BI en un escenario de tráfico de 25000 dispositivos MTC con un valor de $T_{RAO} = 1 ms$	36
Tabla 12. Resultados más relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio bajo diferentes valores de BI en un escenario de tráfico de 30000 dispositivos MTC con un valor de $T_{RAO} = 1 ms$	37

Tabla 13. Resultados del retardo en el acceso en función del rango óptimo de BI obtenido a partir del cumplimiento de la condición de fiabilidad en la métrica de (P_S) para los diferentes escenarios de tráfico mMTC con un valor de $T_{RAO} = 5 ms$.	42
Tabla 14. Resultados del retardo en el acceso en función del rango óptimo de BI obtenido a partir del cumplimiento de la condición de fiabilidad en la métrica de (P_S) para los diferentes escenarios de tráfico mMTC con un valor de $T_{RAO} = 1 ms$.	43
Tabla 15. Resultados del promedio de transmisiones de preámbulos (k) considerando el rango de valores óptimos de BI obtenidos a partir de la (P_S) para las diferentes demandas de tráfico MTC con un valor de $T_{RAO} = 5 ms$ y un máximo de 10 intentos de transmisión de preámbulo ($kmax$).	46
Tabla 16. Resultados del promedio de transmisiones de preámbulos (k) considerando el rango de valores óptimos de BI obtenidos a partir de la Ps para las diferentes demandas de tráfico MTC con un valor de $T_{RAO} = 1 ms$ y un máximo de 10 intentos de transmisión de preámbulo ($kmax$).	48
Tabla 17. Descripción de los resultados obtenidos en base al rango de BI óptimo para las distintas métricas cuando se emplea un valor de $T_{RAO} = 5 ms$.	49
Tabla 18. Descripción de los resultados obtenidos en base al rango de BI óptimo para las distintas métricas cuando se emplea un valor de $T_{RAO} = 1 ms$.	50
Tabla 19. Resultados obtenidos de las medias en función a las diferentes métricas de rendimiento .	52
Tabla 20. Resultados de los parámetros de la prueba de hipótesis para la variable de probabilidad de acceso satisfactorio (P_S) .	53
Tabla 21. Resultados de los parámetros de la prueba de hipótesis para la variable del retardo en el acceso (D) .	54
Tabla 22. Resultados de los parámetros de la prueba de hipótesis para la variable del número promedio de transmisiones de preámbulos (k) .	54
Tabla 23. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5 ms$ para un escenario de tráfico de 10000 dispositivos MTC.	61
Tabla 24. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5 ms$ para un escenario de tráfico de 15000 dispositivos MTC.	62
Tabla 25. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5 ms$ para un escenario de tráfico de 20000 dispositivos MTC.	62
Tabla 26. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5 ms$ para un escenario de tráfico de 25000 dispositivos MTC.	63
Tabla 27. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio con diferentes valores de BI un valor de $T_{RAO} = 5 ms$ para un escenario de tráfico de 30000 dispositivos MTC.	63

Tabla 28. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1 ms$ para un escenario de tráfico de 10000 dispositivos MTC.	64
Tabla 29. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1 ms$ para un escenario de tráfico de 15000 dispositivos MTC.	65
Tabla 30. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1 ms$ para un escenario de tráfico de 20000 dispositivos MTC.	65
Tabla 31. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1 ms$ para un escenario de tráfico de 25000 dispositivos MTC.	66
Tabla 32. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio con diferentes valores de BI un valor de $T_{RAO} = 1 ms$ para un escenario de tráfico de 30000 dispositivos MTC.	66
Tabla 33. Resultados correspondientes al retardo en el acceso basado en el percentil 95 con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5 ms$ para un escenario de tráfico de 10000 dispositivos MTC.....	67
Tabla 34. Resultados correspondientes al retardo en el acceso basado en el percentil 95 con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5 ms$ para un escenario de tráfico de 15000 dispositivos MTC.....	68
Tabla 35. Resultados correspondientes al retardo en el acceso basado en el percentil 95 con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5 ms$ para un escenario de tráfico de 20000 dispositivos MTC.....	68
Tabla 36. Resultados correspondientes al retardo en el acceso basado en el percentil 95 con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5 ms$ para un escenario de tráfico de 25000 dispositivos MTC.....	69
Tabla 37. Resultados correspondientes al retardo en el acceso basado en el percentil 95 con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5 ms$ para un escenario de tráfico de 30000 dispositivos MTC.....	69
Tabla 38. Resultados correspondientes al retardo en el acceso basado en el percentil 95 con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1 ms$ para un escenario de tráfico de 10000 dispositivos MTC.....	70
Tabla 39. Resultados correspondientes al retardo en el acceso basado en el percentil 95 con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1 ms$ para un escenario de tráfico de 15000 dispositivos MTC.....	71
Tabla 40. Resultados correspondientes al retardo en el acceso basado en el percentil 95 con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1 ms$ para un escenario de tráfico de 20000 dispositivos MTC.....	71

Tabla 41. Resultados correspondientes al retardo en el acceso basado en el percentil 95 con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1 ms$ para un escenario de tráfico de 25000 dispositivos MTC.....	72
Tabla 42. Resultados correspondientes al retardo en el acceso basado en el percentil 95 con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1 ms$ para un escenario de tráfico de 30000 dispositivos MTC.....	72
Tabla 43. Resultados correspondientes al número promedio de transmisiones de preámbulos con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5 ms$ para un escenario de tráfico de 10000 dispositivos MTC.....	73
Tabla 44. Resultados correspondientes al número promedio de transmisiones de preámbulos con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5 ms$ para un escenario de tráfico de 15000 dispositivos MTC.....	74
Tabla 45. Resultados correspondientes al número promedio de transmisiones de preámbulos con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5 ms$ para un escenario de tráfico de 20000 dispositivos MTC.....	74
Tabla 46. Resultados correspondientes al número promedio de transmisiones de preámbulos con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5 ms$ para un escenario de tráfico de 25000 dispositivos MTC.....	75
Tabla 47. Resultados correspondientes al número promedio de transmisiones de preámbulos con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5 ms$ para un escenario de tráfico de 30000 dispositivos MTC.....	75
Tabla 48. Resultados correspondientes al número promedio de transmisiones de preámbulos con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1 ms$ para un escenario de tráfico de 10000 dispositivos MTC.....	76
Tabla 49. Resultados correspondientes al número promedio de transmisiones de preámbulos con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1 ms$ para un escenario de tráfico de 15000 dispositivos MTC.....	77
Tabla 50. Resultados correspondientes al número promedio de transmisiones de preámbulos con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1 ms$ para un escenario de tráfico de 20000 dispositivos MTC.....	77
Tabla 51. Resultados correspondientes al número promedio de transmisiones de preámbulos con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1 ms$ para un escenario de tráfico de 25000 dispositivos MTC.....	78
Tabla 52. Resultados correspondientes al número promedio de transmisiones de preámbulos con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1 ms$ para un escenario de tráfico de 30000 dispositivos MTC.....	78

RESUMEN

El despliegue a gran escala de las comunicaciones tipo máquina por medio de la red de acceso por radio celular permite que una gran cantidad de dispositivos contienda por los recursos de la red para ofrecer diversos servicios. Esto origina colisiones en el canal de acceso aleatorio. El procedimiento de *backoff* es una técnica utilizada para la resolución de colisiones mediante la asignación de un tiempo de espera antes de una transmisión. Este tiempo de espera lo determina la estación base a través del Indicador de *Backoff* (*BI*) y los dispositivos lo eligen aleatoriamente en función del *BI* configurado.

El presente trabajo de investigación evalúa y caracteriza el impacto que provoca el modificar los valores de *BI* bajo diferentes escenarios de tráfico masivo mediante el uso de métricas de rendimiento como la probabilidad de acceso satisfactorio, el retardo en el acceso y el número promedio de transmisiones de preámbulo. Para ello se desarrolló un modelo de simulación del procedimiento de acceso aleatorio basado en contención empleando el software Matlab y considerando las especificaciones del organismo de estandarización *Third Generation Partnership Project* (3GPP). En base a los resultados obtenidos, se caracterizó un rango óptimo de los valores de *BI* mediante el cumplimiento de diferentes condiciones de fiabilidad para cada escenario. Con una configuración adecuada de los parámetros del RACH se alcanza una probabilidad de acceso satisfactorio mayor al 85 % con un aumento razonable en el retardo de acceso lo que se considera ideal para aplicaciones tolerantes al retardo en escenarios con tráfico masivo.

Palabras clave: Acceso masivo, canal de acceso aleatorio, comunicaciones tipo máquina, redes IoT celular, métricas de rendimiento, tiempo de backoff.

ABSTRACT

The large-scale deployment of Machine-Type Communications (MTC) over the cellular radio access network allows many devices to compete for network resources to offer various services. They are causing collisions in the random-access channel. The backoff procedure is a technique used for collision resolution by assigning a waiting time before transmission. This timeout is determined by the base station through the *Backoff Indicator* (BI) and is chosen randomly by the devices based on the configured *BI*.

The present research work evaluates and characterizes the impact of changing the BI values under different bulk traffic scenarios by using performance metrics such as the probability of successful access, access delay, and the average number of preamble transmissions. For this purpose, a simulation model of the random-access procedure based on contention was developed using Matlab software and considering the specifications of the Third Generation Partnership Project (3GPP) standardization body. Based on the results obtained, an optimal range of BI values was characterized by meeting different reliability conditions for each scenario. With a suitable configuration of the RACH parameters, a successful access probability greater than 85% is achieved with a moderate increase in access delay, which is considered ideal for delay-tolerant applications in scenarios with massive traffic.

Keywords: Massive access, random access channel, machine-type communications, cellular IoT networks, performance metrics, backoff time.

Reviewed by:
Ms.C. Ana Maldonado León
ENGLISH PROFESSOR
C.I.0601975980

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, nos encontramos en un mundo que se mueve más allá de dispositivos independientes hacia una nueva era tecnológica donde prácticamente todo está conectado. La comunicación tipo máquina (*Machine Type Communication*, MTC), se puede definir como la interacción ubicua y automatizada de información entre dispositivos (computadoras, actuadores, sensores, dispositivos móviles, automóviles) sin la presencia o intervención humana dentro de una red común, también llamada la Internet de las cosas (*Internet of Things*, IoT) [1].

La comunicación masiva tipo máquina (*Massive Machine Type Communication*, mMTC) como sus siglas indican, trata del acceso masivo por parte de una gran cantidad de dispositivos, es decir, brinda conectividad inalámbrica a decenas de miles de millones de dispositivos tipo máquina de baja complejidad y potencia [2]. Se prevé que para el año 2023 habrá 14.700 millones de conexiones de tipo MTC a nivel mundial [3]. El Proyecto de Asociación de Tercera Generación (*Third Generation Partnership Project*, 3GPP) ha incorporado estándares en las redes celulares para MTC [4]. Por ello las redes celulares como Long-Term Evolution (LTE), LTE-Advanced (LTE-A) y redes de quinta generación (5G) se han considerado aptas para brindar conectividad para MTC, tecnología denominada IoT celular (*Cellular Internet of Things*, CIoT). Entre las principales características que ofrece la red celular para este tipo de comunicaciones está la de poseer una infraestructura adecuada que abarca una amplia cobertura, gran capacidad, escalabilidad, eficiencia espectral, baja latencia y otorgar garantías en la calidad de servicio (*Quality of Service*, QoS) [5].

Los diferentes servicios de mMTC, que incluyen atención médica electrónica, comercio electrónico, bienes de consumo, transporte electrónico y sistema de control exhibirán diferentes patrones de tráfico, lo que, combinado con la gran cantidad de dispositivos, hace que el problema de la asignación de recursos sea muy desafiante [6]. Dando como resultado colisiones e inclusive la anulación de las solicitudes de acceso aleatorio en el canal de acceso aleatorio (*Random Access Channel*, RACH) [7]. Sin embargo, no todos los dispositivos están conectados todo el tiempo: pueden estar solo recibiendo datos, transmitiéndolos o simplemente estar en estado de espera [8]. El modo estándar para el acceso a la red en comunicaciones celulares se realiza mediante el procedimiento de acceso aleatorio basado en contención [9]. El dispositivo debe realizar dicho

procedimiento como primer paso para adquirir acceso inicial a los recursos de la red. Este procedimiento se realiza a través del RACH y consta de cuatro pasos:

- 1) Transmisión de preámbulo,
- 2) Respuesta de acceso aleatorio (*Random Access Response*, RAR),
- 3) Solicitud de conexión,
- 4) Resolución de contienda.

De acuerdo con los estándares del 3GPP, se realiza un procedimiento de *backoff* en caso de que exista una falla de acceso o colisión por parte de un dispositivo, independientemente de la causa [9]. Una vez finalizado este procedimiento de *backoff*, el dispositivo tiene que iniciar el procedimiento de acceso aleatorio nuevamente. Este procedimiento de *backoff* está incorporado en el RACH y es aplicado a todos los dispositivos que fallaron en tener acceso a la red, dicho procedimiento consta en la asignación de un tiempo aleatorio predeterminado y comunicado por la estación base hacia el dispositivo siguiendo una distribución uniforme, el dispositivo debe esperar dicho tiempo antes de volver a intentar el procedimiento de acceso aleatorio mediante el uso de un preámbulo. Este intervalo de tiempo se denomina tiempo de *backoff* (T_{BO}), y se calcula en función de un indicador denominado *Backoff Indicator*, en adelante (*BI*) cuyo valor varía entre 0 a 960 ms.

En el presente proyecto de investigación se pretende evaluar y caracterizar el impacto que produce el tiempo de *backoff*, a través de las métricas de rendimiento tales como la probabilidad de acceso satisfactorio (P_s), el retardo en el acceso (D) y el número promedio de preámbulos transmitidos (k). Los resultados generados a través de dichas métricas se obtendrán mediante la configuración y variación de los parámetros del RACH tal como el *BI*, los escenarios de tráfico masivo (mMTC) y la periodicidad de las oportunidades de acceso aleatorio (*Random Access Opportunity*, RAO). Dichos resultados permitirán determinar un rango de valores óptimos del *BI* asumiendo condiciones de fiabilidad basadas en las configuraciones de periodicidad de RAOs en adelante (T_{RAO}) para cada escenario de tráfico masivo, con la finalidad de cumplir lo indicado por el 3GPP en su especificación [9] y tener una referencia del rendimiento que se obtendría en la red de acceso por radio (*Radio Access Network*, RAN).

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

El tráfico masivo de tipo mMTC se refiere a llegadas masivas de solicitudes de acceso y de forma casi simultánea en un intervalo de tiempo corto, debido a que la transmisión en MTC se realiza en enlace ascendente se cuenta con un número limitado de recursos es por ello por lo que se provocan colisiones en el RACH, es aquí donde surge un problema que reduce drásticamente el rendimiento del canal. Se han realizado varios estudios que hablan de ciertas técnicas y algoritmos que permiten optimizar el rendimiento del RACH. Sin embargo, solo pocos estudios analizan el impacto del tiempo de *backoff* (T_{BO}) en función de su indicador (BI) durante escenarios con tráfico masivo.

Otro problema es que estudios relacionados con el rendimiento del RACH no han realizado una evaluación o un barrido de todos los valores del BI y el impacto que provoca en el rendimiento del RACH, incluso algunos estudios no consideran el comportamiento aleatorio como lo indica el estándar 3GPP que es el organismo que normaliza las comunicaciones celulares a nivel internacional. Cuando ocurre una colisión independientemente de la causa, los dispositivos se someten al procedimiento de *backoff*; dependiendo de cómo se configure este procedimiento generará un retardo en el acceso a la red. En el presente proyecto se pretende caracterizar y evaluar cuánto puede afectar dicho tiempo o retardo al manejar diferentes escenarios de tráfico masivo empleando distintas configuraciones de los parámetros del RACH.

Se partirá desde la configuración de un tiempo de *backoff* estático, en donde se fijará un valor de BI para los diferentes escenarios de tráfico masivo y se fijará también un valor de T_{RAO} . A partir de aquello se evaluará tres métricas de rendimiento: (P_s), (D) y (k); se repetirá el mismo procedimiento, pero alternando los parámetros es decir se fijará un escenario de tráfico, un valor de T_{RAO} y se variará el BI hasta llegar a su valor máximo. A partir de los resultados obtenidos mediante las métricas de rendimiento se determinará un rango óptimo de valores de BI asumiendo condiciones de fiabilidad para cada escenario de tráfico masivo evaluado con el objetivo de dar cumplimiento a lo indicado por la especificación del 3GPP [9].

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar y caracterizar el impacto del tiempo de *backoff* en la red de acceso radio de IoT celular con tráfico masivo.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el procedimiento de acceso aleatorio en la red de acceso radio celular con tráfico masivo tipo máquina basado en estándares 3GPP.
- Modelar el canal de acceso aleatorio junto con el procedimiento de *backoff* para obtener indicadores clave de rendimiento de la red.
- Caracterizar mediante un modelo de simulación el impacto del tiempo de *backoff* en las métricas de rendimiento de la red bajo diferentes condiciones de tráfico mMTC.

CAPÍTULO II

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. ANTECEDENTES

El 3GPP, en su especificación técnica “*Study on RAN Improvements for Machine-type Communications; (Release 11)*” [4], propone varias soluciones para tratar la congestión en el RACH al emplear comunicaciones MTC en la RAN. El autor [10], analizó y comparó el rendimiento de cada una de las soluciones propuestas por el 3GPP en base a tres métricas de rendimiento (probabilidad de colisión, probabilidad de acceso satisfactorio y retardo promedio en el acceso). En su artículo contempla el esquema específico de *backoff* e indica que esta solución posee la tasa más alta de probabilidad de acceso satisfactorio en comparación con las otras soluciones, indica también que este método reduce la colisión y la congestión en el RAN, a costo de incrementar el retardo en el acceso, lo que es un aspecto negativo en aplicaciones de alta prioridad.

Los autores [11], en su estudio han incorporado un acceso aleatorio híbrido donde combinan técnicas de control tanto para la congestión como para las colisiones, con el fin de aumentar el rendimiento en el RACH al emplear comunicaciones MTC con tráfico síncrono. Las técnicas que utilizan específicamente es la de *pre-backoff* y la Restricción de Clases de Acceso (*Access Class Barring*, ACB) en combinación con el acceso aleatorio basado en árboles para disminuir las solicitudes de acceso masivo generadas por los dispositivos. La técnica de *pre-backoff* implementa un período predefinido de *backoff* para redistribuir las llegadas de las solicitudes de acceso, es decir que los dispositivos esperan un tiempo definido antes de realizar el procedimiento de acceso aleatorio (*Random Access Procedure*, RAP). A continuación de aquello, utilizan el acceso aleatorio basado en árboles en el RACH para solucionar las colisiones conduciendo los dispositivos colisionados hacia recursos predeterminados para realizar un nuevo intento de acceso; con ello el acceso aleatorio basado en árboles optimiza en gran manera los recursos en el RACH. Sin embargo, dicho esquema podría aumentar el retraso del procesamiento y consumir mayor energía, esto se debe a su alto grado de complejidad ligado a la sobrecarga de señalización adicional.

En el artículo [1] se analizó la capacidad del RACH en torno al estándar LTE-A mediante el RAP descrito por el 3GPP. También se compararon dos procedimientos de *backoff* para la resolución de colisiones, el procedimiento de *backoff* uniforme con un *backoff* exponencial que opera en torno al número de intentos de acceso previos efectuados por los dispositivos (parámetro de configuración del RACH). Al implementar el ACB junto a los procedimientos antes mencionados aplicados a escenarios con tráfico masivo, descubrieron que la combinación del ACB con el *backoff* exponencial conlleva a una probabilidad de éxito en el acceso ligeramente mayor a costa de aumentar el número promedio de transmisiones de preámbulo en comparación con implementar el procedimiento de *backoff* uniforme.

En el estudio [12], se presenta otro tipo de acceso aleatorio híbrido en el que combinaron el esquema de *backoff* con la restricción de acceso extendido (*Enhanced Access Barring*, EAB) con el propósito de mejorar la probabilidad de acceso satisfactorio en la RAN evitando las colisiones que se provocan por la ráfaga de solicitudes de acceso al tener tráfico masivo. El esquema de *backoff* se aplica cuando se libera un acceso de clase bloqueado, es decir que los dispositivos de este tipo de clase esperan un tiempo aleatorio (procedimiento de *backoff*) antes de poder realizar el RAP. Esta combinación de esquemas de control de congestión genera mejoras muy favorables en lo que respecta a la probabilidad de acceso satisfactorio y el número promedio de transmisiones de preámbulos en comparación con el esquema EAB aplicado independientemente sin ninguna técnica de control adicional. No obstante, la combinación de estos esquemas podría generar un incremento en el retardo en el acceso, donde dicho retardo debería estar en el valor más bajo posible.

2.2. CELLULAR INTERNET OF THINGS (CIoT)

CIoT o también conocido como IoT celular, es básicamente una forma de interconectar elementos físicos como: sensores, detectores y medidores a internet mediante el uso de las mismas redes celulares que utilizan los teléfonos móviles inteligentes en la actualidad [13]. La eficiencia del procedimiento de acceso aleatorio influye en gran medida en el rendimiento de los sistemas CIoT, para establecer conexiones masivas. Los servicios que integran los estándares 3GPP, poseen objetivos de alto nivel que incluyen que más de 30 mil dispositivos IoT se puedan conectar a través de un solo punto de acceso [14]. Ericsson prevé alrededor de 5 mil millones de conexiones para

2025, por lo que dicha tecnología es de suma importancia para diferentes sectores como la minería, manufactura, servicios públicos, transporte, electrónica de consumo, automoción, ferrocarriles, salud y agricultura [15]. En la **Figura 1** se ilustra la conectividad de varios servicios y aplicaciones de IoT en la red celular.

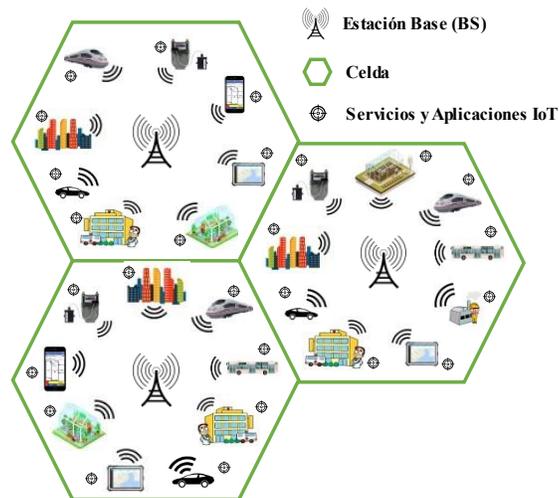


Figura 1. Descripción de conectividad CIoT.

Fuente: Autor

2.3. COMUNICACIÓN MASIVA TIPO MÁQUINA (mMTC)

Los escenarios con mMTC, están orientados al respaldo de futuras aplicaciones referentes al IoT y la industria. Con el propósito de poder realizar una interacción entre dispositivos (por lo general sensores) de forma masiva, ubicua y automatizada dentro de una red común ya sea esta de forma cableada o inalámbrica. En un sistema mMTC, decenas de millones de dispositivos están conectados por una única estación base celular (*Base Station*, BS) y el período de transmisión está dominado por la transmisión de enlace ascendente. A diferencia de las comunicaciones de tipo humano (*Human Type Communications*, HTC) que realizan la transmisión en enlace descendente [16]. En la **Figura 2** se ilustra como distintos servicios que ofrece la mMTC se conectan a una misma BS. Debido a que en las comunicaciones mMTC, operan en enlace ascendente, el tamaño de los paquetes es pequeño, es decir que su transmisión es corta. El número de dispositivos MTC activos determina las llegadas simultáneas de paquetes en cada intervalo. Además, dado que los

dispositivos MTC son generalmente actuadores o sensores, el tráfico de datos en mMTC es intermitente; debido a que los dispositivos se activan de forma esporádica [17].



Figura 2. Conectividad de diversos servicios de mMTC en una misma BS.

Fuente: [18]

2.4. PROCEDIMIENTO DE ACCESO ALEATORIO BASADO EN CONTENCIÓN

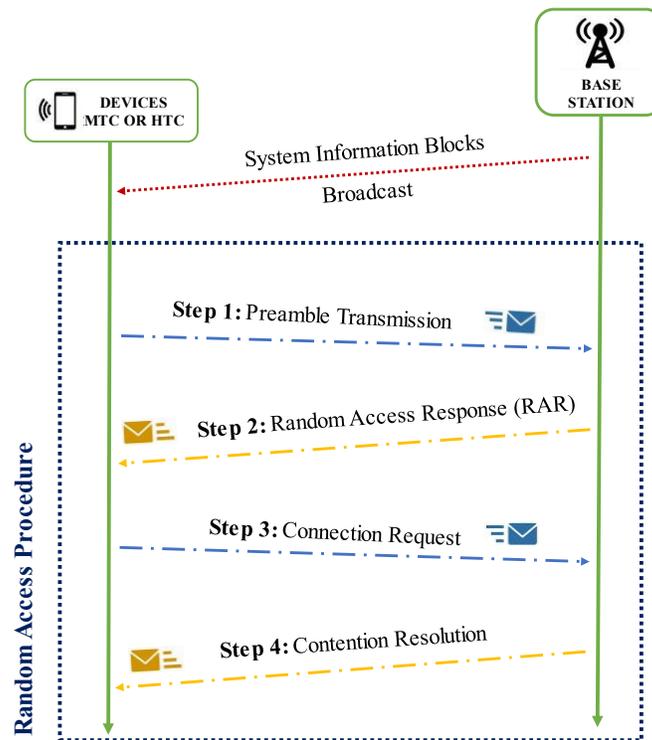


Figura 3. RAP basado en contención.

Fuente: Autor

En las redes celulares tales como LTE / LTE-A y 5G, el modo estándar para el acceso a la red, al manejar tráfico mMTC, es mediante el acceso aleatorio basado en contención (ilustrado en la **Figura 3**) [9]. El mismo es iniciado por los dispositivos ya sean de tipo MTC o HTC cuando se encuentran en estado inactivo y requieren solicitar los recursos de radio necesarios para enviar datos hacia la red; su transmisión se realiza por enlace ascendente lo que indica que los recursos disponibles son muy limitados cuando se tiene tráfico masivo. Antes de iniciar el RAP, los dispositivos deben obtener primero algunos parámetros básicos de configuración, tales como los recursos de tiempo / frecuencia predeterminados donde se conceden los intentos de acceso aleatorio (denominados RAOs) y deben realizar la sincronización de enlace ascendente [19]. La BS transmite esta información periódicamente a través del bloque de información maestro (*Master Information Block*, MIB) y los bloques de información del sistema (*System Information Blocks*, SIBs) [1]. El RAP basado en contención se realiza a través del RACH y consta de cuatro pasos:

Paso 1 - Transmisión del preámbulo: En el primer mensaje, los dispositivos seleccionan aleatoriamente uno de los preámbulos disponibles entre los 54 existentes para realizar el RAP basado en contención en cada intervalo de tiempo. Dicho preámbulo se transmite después haciendo uso del canal físico de acceso aleatorio (*Physical Random Access Channel*, PRACH) a la BS. Debido a las propiedades ortogonales que poseen los preámbulos, varios dispositivos pueden seleccionar el mismo preámbulo y acceder a la estación base en la misma RAO, esto originaría una colisión debido a que la BS no podrá decodificar ninguno de los preámbulos receptados, por lo cual el acceso se considera fallido.

Paso 2 - Respuesta de acceso aleatorio (RAR): Después de recibir los preámbulos a través del PRACH, la BS transmite el mensaje RAR a todos los preámbulos detectados y que se han podido decodificar correctamente a través del PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*). Este mensaje contiene los recursos de enlace ascendente, la identificación temporal y el valor de *BI* que se puede utilizar para el procedimiento de *backoff*. Los dispositivos comienzan a esperar una ventana de tiempo, denominada ventana de respuesta de acceso aleatorio (WRAR), para recibir una concesión de enlace ascendente (Uplink Grant) por parte del BS. Para obtener en la red un mejor funcionamiento, se emite una sola respuesta en cada subtrama la cual tendrá por cada preámbulo decodificado un Uplink Grant. Si los dispositivos no reciben ningún Uplink Grant, los

mismos retransmitirán sus preámbulos después de un tiempo de espera aleatorio (Procedimiento de *backoff*), volviendo a empezar el RAP desde el primer paso.

Paso 3 - Solicitud de conexión: El dispositivo envía una solicitud de conexión a la BS haciendo uso de los recursos de enlace ascendente asignados y garantizados en el paso anterior. Este mensaje contiene el propósito de la solicitud de acceso y el identificador del dispositivo. Si la BS decodificó correctamente los preámbulos transmitidos por varios dispositivos, estos transmitirán la solicitud de conexión utilizando los mismos recursos físicos originando una colisión. Por ello la BS sería incapaz de decodificar los mensajes emitidos.

Paso 4 - Resolución de Contienda: La BS emite este mensaje como respuesta al mensaje anterior para informar al dispositivo que garantiza un acceso exitoso a los recursos de la red. El dispositivo que no recibe dicho mensaje debe realizar nuevamente otro intento del RAP, empleando el procedimiento de *backoff* y partiendo nuevamente desde el primer paso en un RAO próximo. Hay un número máximo de intentos de transmisión después de los cuales se descarta la solicitud del dispositivo.

2.5. OPORTUNIDAD DE ACCESO ALEATORIO (RAO)

Cada celda celular alberga 64 preámbulos disponibles para el RAP de los cuales sólo 54 de ellos están reservados para el RAP basado en contención [9]. Con lo que respecta a la transmisión de preámbulos, se lo realiza a través de un canal físico denominado (*Physical Random Access Channel*, PRACH) el cual es un bloque de recursos de tiempo y frecuencia que se encuentran reservados en la BS. Los intentos de acceso aleatorio por parte de los dispositivos al hacer uso de los recursos del PRACH se les denomina RAO, los cuales no son más que secuencias periódicas reservadas en el canal de enlace ascendente para la transmisión de solicitudes de acceso hacia la red [20].

Los recursos del PRACH están disponibles en las tramas de radio cuya duración es de 10 ms, en cada trama se encuentra disponible un número limitado de recursos, dicho número depende de un parámetro de configuración denominado "*prach-ConfigIndex*" que asigna una periodicidad de RAOs y es difundida por la BS. La estructura de trama utilizada es la de tipo 1 cuya longitud de subtrama es de 1 ms, para ella existe un total de 64 configuraciones de PRACH disponibles

partiendo desde una configuración mínima de periodicidad de un RAO por cada dos tramas (cada 20 ms) hasta una máxima de una RAO por cada subtrama (cada 1 ms) [21]. Por ejemplo, si este parámetro de configuración es igual a 6 entonces la periodicidad de RAOs es de dos RAOs por cada trama. El número de preámbulos disponibles para el modo de contención es de 54 por cada RAO (durante 1 ms). En la **Figura 4** se ilustra las configuraciones del índice del PRACH más relevantes.

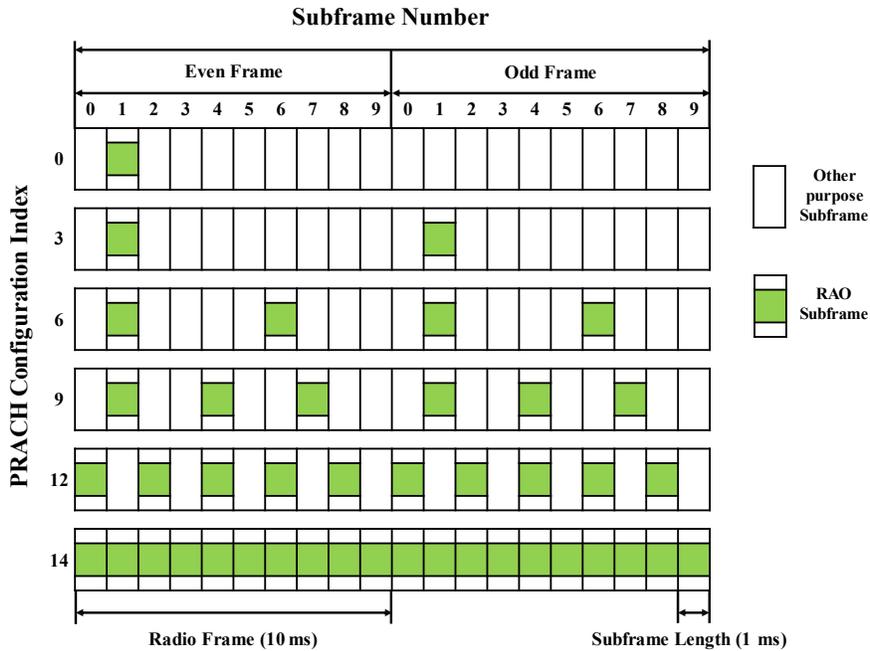


Figura 4. Estructura de trama tipo 1 con diferentes configuraciones del índice de PRACH.

Fuente: [21]

2.6. PROCEDIMIENTO DE BACKOFF

El proceso de *backoff* es una técnica de control de colisiones en el RACH, propuesta por los estándares 3GPP en caso de falla en el acceso a la red [9]. Esta técnica de control se encuentra dentro del RAP basado en contención, dicho procedimiento es aplicado para todos los dispositivos que fallaron en el primer intento de obtener un acceso satisfactorio en la red. Los dispositivos deben esperar un periodo de tiempo predeterminado antes de reintentar el procedimiento de acceso aleatorio (*Random Access, RA*) y puedan intentar nuevamente una transmisión de preámbulo en una próxima RAO disponible, este tiempo se lo conoce como tiempo de *backoff* T_{BO} [ms] y es elegido de forma aleatoria por la BS el mismo responde a la siguiente ecuación:

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

Ecuación 1. Tiempo de backoff.

Fuente: [1]

donde $U()$ significa distribución uniforme, BI es el indicador de *backoff* definido por la BS y su valor varía de 0 a 960 ms. El valor de BI se envía en el RAR (paso 2), que es leído por todos los dispositivos que enviaron un preámbulo en una RAO anterior. Esto significa que cada dispositivo que no obtuvo una confirmación por parte del RAR se considera como un intento fallido (se originó una colisión), recibe el BI , de tal forma que pueda realizar otro intento partiendo desde el primer paso nuevamente [1]. De igual forma ocurre con los dispositivos que no reciben el mensaje de resolución de contienda (paso 4), que garantiza un acceso exitoso a los recursos de la red, reciben el BI y realizan otro intento partiendo nuevamente desde el primer paso. En la **Figura 5** y la **Figura 6** se ilustran como se aplica el procedimiento de *backoff* en el RACH cuando ocurre una colisión en los pasos antes mencionados respectivamente.

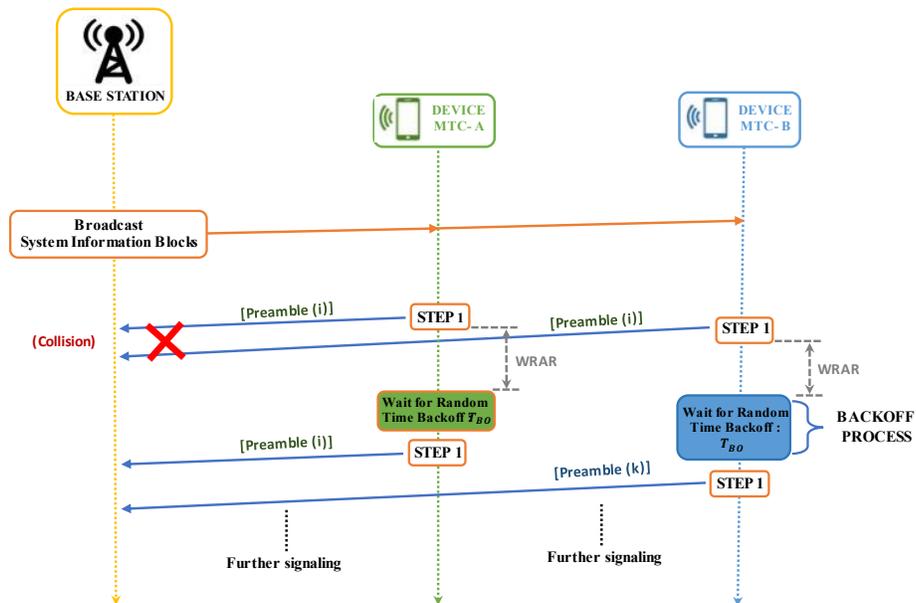


Figura 5. Colisión en el primer paso cuando múltiples dispositivos usan el mismo preámbulo (preamble (i)) y no es decodificado, se aplica el T_{BO} para realizar un nuevo intento.

Fuente: Autor

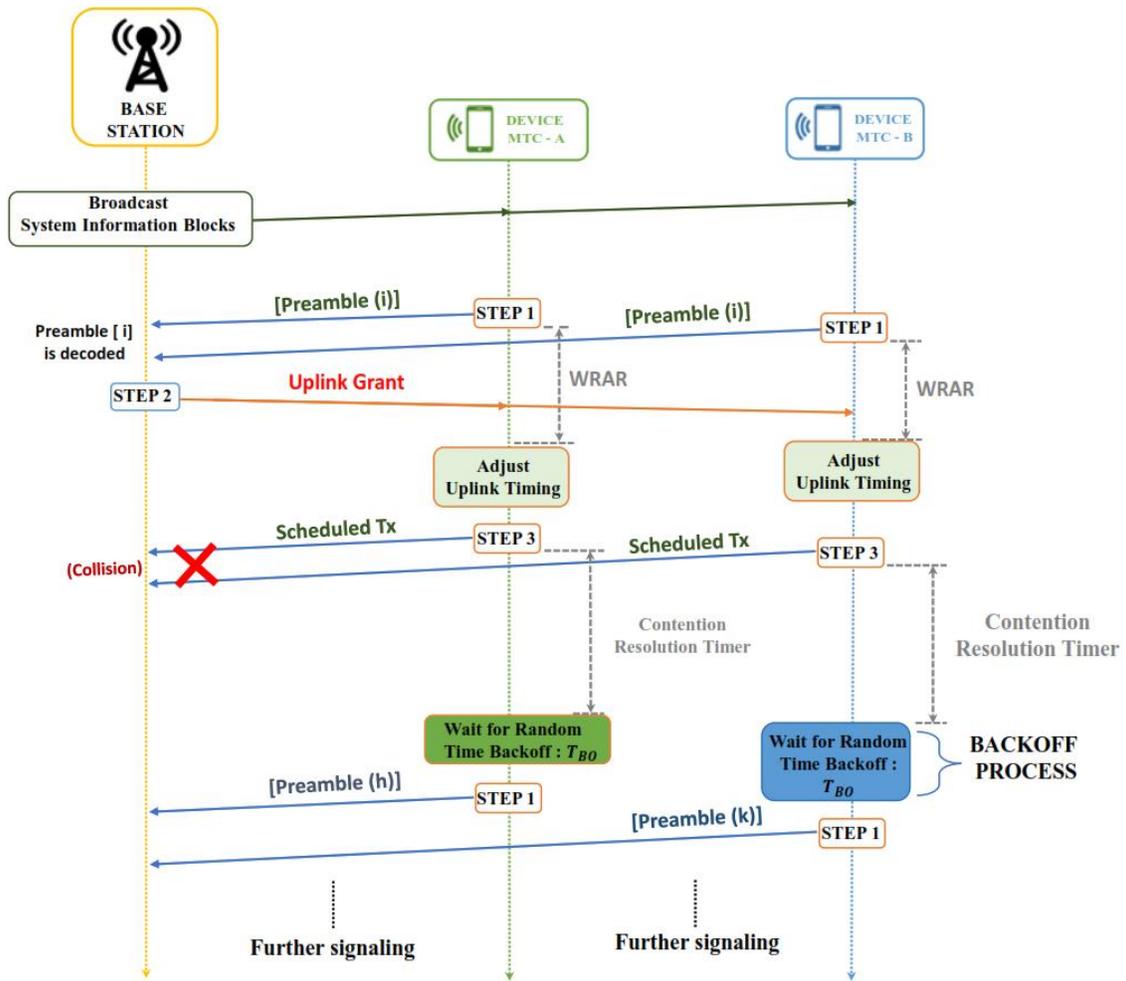


Figura 6. Colisión en el tercer paso cuando múltiples dispositivos usan los mismos recursos físicos de enlace ascendente, se aplica el T_{BO} para realizar un nuevo intento.

Fuente: Autor

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1. INVESTIGACIÓN EXPLORATORIA

En el presente proyecto se recopila información de estudios científicos referentes al RAP basado en contención aplicado a comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC) y del procedimiento de *backoff* como técnica de control independiente para tratar la problemática de colisiones que se generan en el RACH. Se explorará además el impacto que se genera al variar el indicador de *backoff* (*BI*) sobre el RACH, bajo diferentes demandas de tráfico (HTC y MTC) basado en los estándares 3GPP en torno a las diferentes métricas de rendimiento y evaluar los resultados obtenidos para ver la factibilidad de aplicar la técnica de control de colisiones (procedimiento de *backoff*) en aplicaciones tolerantes a retardos.

3.2. MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

3.2.1. MÉTODO CIENTÍFICO

El método científico es un proceso cuya finalidad es la de establecer una relación que existe entre diferentes hechos, para adquirir un criterio verificable y primordial referente al tema de investigación. Por consiguiente, se podrá establecer criterios basados en un modelado analítico y métodos de aproximación para evaluar el impacto que se genera al variar parámetros principales de configuración del RACH como el *BI* y T_{RAO} para los distintos escenarios de tráfico masivo a través de los resultados obtenidos en las distintas métricas de rendimiento.

3.2.2. TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La observación como técnica se basa en una agrupación de normas dirigidas a evaluar un fenómeno específico para dar a conocer la realidad de este y así poder analizar de forma sistemática y con precisión situaciones que ocurran con respecto a los objetivos propuestos en la investigación. Los parámetros por considerar serían el número de dispositivos que acceden satisfactoriamente a la red cuando son sometidos al RAP basado en contención, el retardo de acceso generado tras completar

con éxito el RAP basado en el percentil 95 que se encuentra más próximo al retardo máximo generado y el número promedio de transmisiones de preámbulo.

3.2.3. INSTRUMENTOS

Para el desarrollo del presente documento se utilizarán los siguientes instrumentos:

- 3GPP TR 37.868 Estudio sobre mejoras en el RAN para MTC.
- 3GPP TS 36.321 Especificación del protocolo de Control de Acceso al Medio.
- 3GPP TS 36.211 Especificación sobre los Canales Físicos y Modulación
- Artículos Científicos relacionados con el tiempo de *backoff* como técnica de control de colisiones.
- Artículos Científicos relacionados con el rendimiento del RACH con tráfico mMTC.
- Software Matlab para implementar el modelo de simulación.

3.3. POBLACIÓN, MUESTRA Y MÉTRICAS DE RENDIMIENTO

3.3.1. POBLACIÓN

La población estará conformada por el número de dispositivos que ingresan a la BS e intentan obtener acceso a la red a través del RACH. Este conjunto de dispositivos varía desde 10000 a 30000 (tráfico masivo mMTC) el cual sigue una distribución Beta de parámetros ($\alpha=3$ y $\beta=4$) para los tiempos de llegada (modelo de tráfico MTC sugerido por los estándares 3GPP) [4]. Dicha población se someterá al modelo de simulación del RAP basado en contención considerando tráfico HTC de fondo, de manera que se asemeje a un comportamiento real.

3.3.2. MUESTRA

La muestra se determinará en base a los dispositivos que lograron culminar de forma satisfactoria el RAP basado en contención, esto se obtendrá mediante el modelo de simulación del RACH. En la **Figura 7** se puede apreciar cómo se distribuye la población (línea punteada) y cómo se genera la muestra (línea de color azul) con la cual se evaluarán las diferentes métricas de rendimiento antes mencionadas en torno a la variación del BI , T_{RAO} y los distintos escenarios con tráfico masivo.

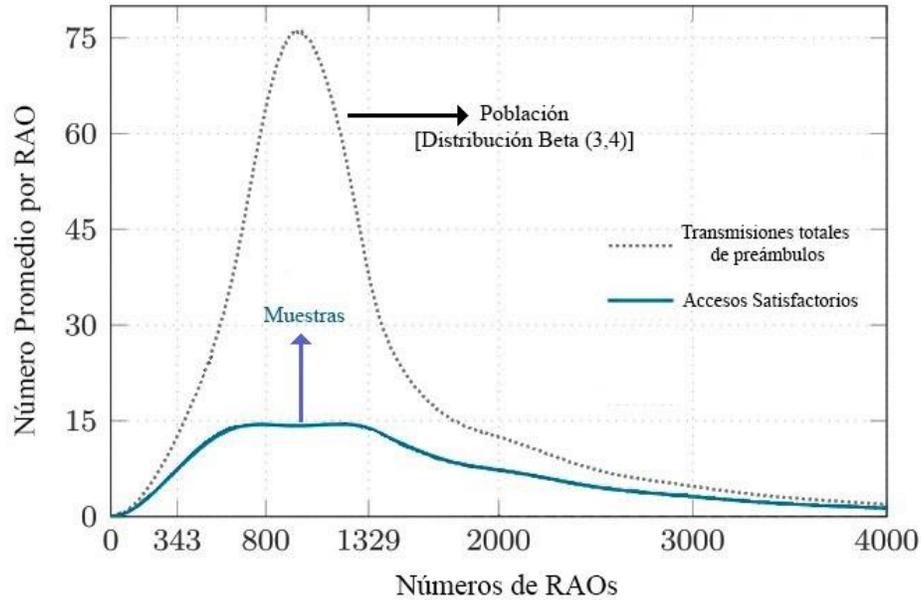


Figura 7. Descripción de la población empleando la distribución Beta (3,4) y la muestra en torno a los dispositivos que lograron un acceso satisfactorio.

Fuente: Autor

3.3.3. MÉTRICAS DE RENDIMIENTO

3.3.3.1. PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO

Se denota por la variable P_s , y está definida como la relación que existe entre los dispositivos que completan con éxito el RAP basado en contención y el total de dispositivos que ingresaron a la BS durante el tiempo de simulación efectuado, tal y como se describe en la **Ecuación 2**.

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

Ecuación 2. Probabilidad de Acceso Satisfactorio.

Fuente: [1]

Donde

- n_A = Número total de dispositivos MTC con acceso satisfactorio.
- n_T = Número total de dispositivos MTC que ingresaron a la BS.

3.3.3.2. RETARDO EN EL ACCESO

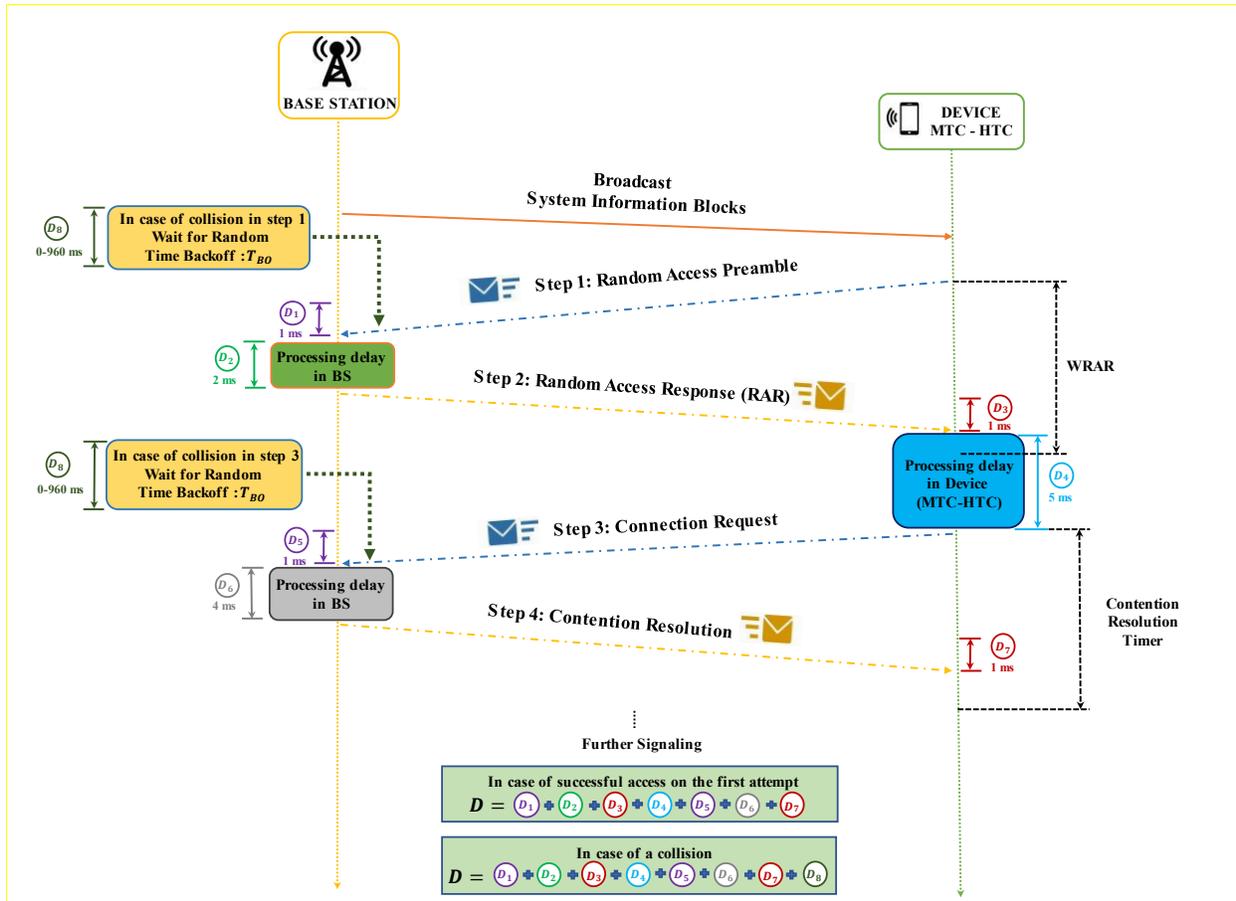


Figura 8. Descripción del retardo que se genera en el RAP basado en contención tras completar todos los pasos.

Fuente: Autor

Se define por la variable D , y es el tiempo transcurrido entre el primer intento de acceso (transmisión de preámbulo) y la finalización satisfactoria del RAP es decir la sumatoria de todos los retardos que se generan en sus distintas etapas considerando también el retardo generado por el BI que está en función al número de intentos realizados hasta obtener un acceso satisfactorio [1]. En la **Figura 8** se puede apreciar cómo están distribuidos los diferentes retardos que se generan

en el todo el RAP basado en contención donde el mínimo retardo generado cuando se ha tenido un acceso satisfactorio en el primer intento será de alrededor de 15 ms. Para evaluar este parámetro partimos de una función de distribución acumulada (*Cumulative Distribution Function*, CDF) descrita en la **Ecuación 3**. La cual se emplea para obtener una distribución de probabilidad en función al retardo generado por parte de cada uno de los dispositivos tras obtener un acceso satisfactorio hacia la red y el total de dispositivos que completaron con éxito el RAP.

$$p(D_{n[ms]}) = \frac{\sum M_A(D_{n[ms]})}{n_A}$$

Ecuación 3. CDF en función al retardo generado en el RAP basado en contención por parte de los dispositivos hasta obtener un acceso satisfactorio.

Fuente: [1]

Donde

- $p(D_{n[ms]})$ = Probabilidad acumulada de “n” retardo expresado en (ms).
- $M_A(D_{n[ms]})$ = Conjunto de dispositivos MTC que obtuvieron un acceso exitoso en “n” retardo.
- n_A = Número total de dispositivos MTC con acceso satisfactorio.

Una vez determinada la distribución de probabilidad para cada uno de los retardos generados a lo largo del RAP, se procederá a emplear interpolación en los resultados obtenidos de tal forma que se tenga una mayor precisión en los datos, posteriormente se los organiza de menor a mayor para poder emplear percentiles (medida de posición) y determinar de mejor manera el mayor retardo en el acceso, se puede apreciar con mayor detalle el algoritmo que se utilizó para la elección del percentil 95 descrito en la **Figura 9**. En la especificación [4], hacen uso del percentil 90 para determinar el máximo retardo; en nuestra investigación haremos uso del percentil 95 que está más próximo al retardo máximo generado, esto sería lo ideal para hacer la evaluación en esta métrica, varios autores realizan sus análisis a partir de una media lo cual no sería correcto debido a la varianza de los datos en sus extremos.

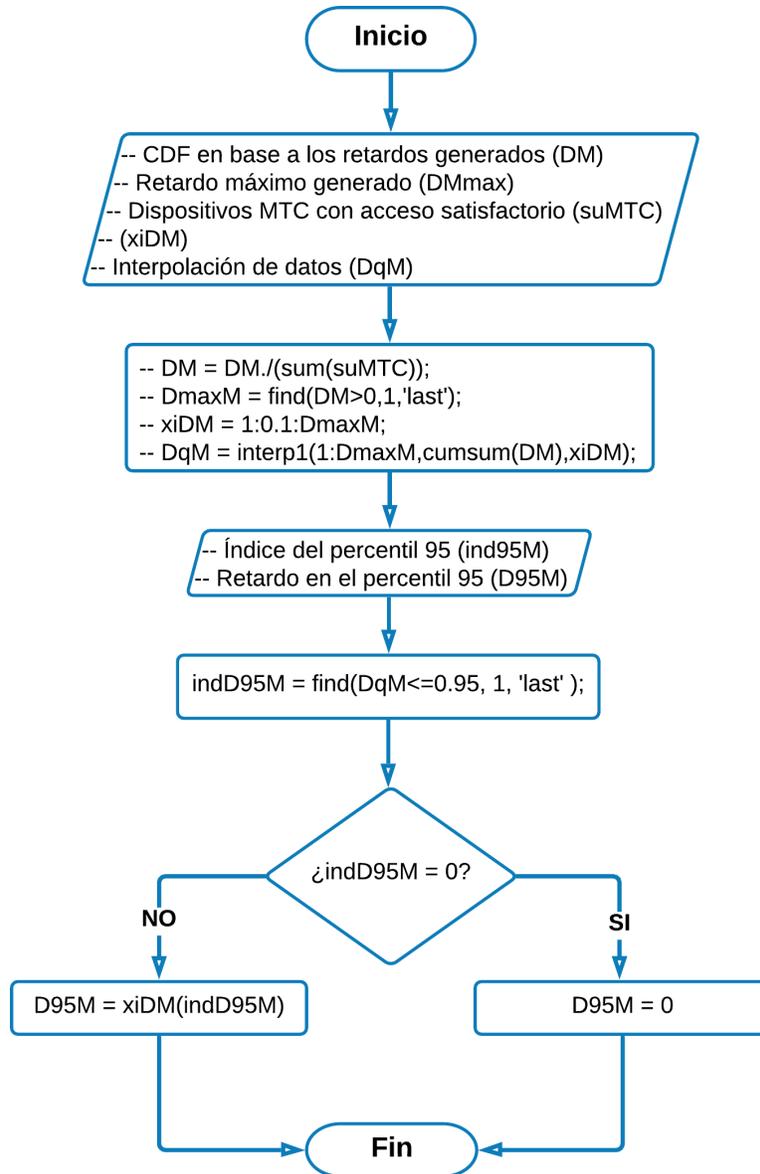


Figura 9. Algoritmo para la elección del percentil 95 mediante el uso del software de Matlab.

Fuente: Autor

3.3.3.3. NÚMERO PROMEDIO DE TRANSMISIONES DE PREÁMBULO

Se define por la variable k , y es la estadística del número de transmisiones que un dispositivo hace uso de un preámbulo, hasta que pueda completar con éxito el RAP, después de su primer intento fallido. Para evaluar este indicador, aplicaremos primero una CDF, descrita en la **Ecuación 4** para cada uno de los preámbulos transmitidos hasta llegar al número máximo de intentos (k_{max}).

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

Ecuación 4. CDF en función al número de preámbulo transmitido.

Fuente: [1]

Donde

- $p(k_n)$ = Probabilidad acumulada de “n” transmisión de preámbulo.
- $M_A(k_n)$ = Conjunto de dispositivos tipo MTC que accedieron exitosamente a la red en “n” transmisión de preámbulo.
- n_A = Número total de dispositivos MTC con acceso satisfactorio.

Una vez que se han obtenido los diferentes datos de probabilidad, como siguiente paso emplearemos la media aritmética ponderada, como se describe en la **Ecuación 5** con el propósito de calcular el valor medio o promedio del número de transmisiones necesarias para efectuar con éxito el RAP y obtener un acceso satisfactorio hacia la red, este valor dependerá del número máximo de retransmisiones de preámbulos que se fije (k_{max}) para nuestro caso utilizaremos un configuración en el RACH de máximo diez transmisiones de preámbulos.

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

Ecuación 5. Media aritmética ponderada

Fuente: [22]

Donde

- μ = Media aritmética ponderada.
- k_n = Número de preámbulo transmitido.
- $p(k_n)$ = Probabilidad acumulada de “n” preámbulo.
- N = Sumatoria de las probabilidades acumuladas en los diferentes preámbulos.

3.4. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Tabla 1. Operacionalización de las variables

Fuente: Autor

VARIABLE INDEPENDIENTE	CONCEPTO	INDICADORES	INSTRUMENTO
Tiempo de <i>backoff</i> (T_{BO})	Se define como el periodo que un dispositivo debe esperar después de un intento fallido de acceso para volver a iniciar el procedimiento de acceso aleatorio a través del RACH.	- Indicador de <i>Backoff</i> (BI).	Observación directa a través de un modelo de simulación del RAP y el procedimiento de <i>backoff</i> (Matlab).
VARIABLE DEPENDIENTE	CONCEPTO	INDICADORES	
Rendimiento de la red	Se define como la cantidad de usuarios que han accedido satisfactoriamente a la red con un retraso considerable, determinado a través del RACH al tener tráfico masivo.	- Probabilidad de acceso satisfactorio (P_s). - Retardo en el acceso (D). - Número promedio de transmisiones de preámbulos (k).	

3.5. PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS

Para evaluar y caracterizar el impacto que se produce al variar el tiempo de *backoff* en torno a diferentes condiciones de tráfico mMTC, se realizó un modelo de simulación del RAP basado en contención en conjunto con el procedimiento de *backoff* mediante Matlab, esto permitió obtener las diferentes métricas de rendimiento de la red considerando tráfico HTC de fondo. El modelo del sistema propuesto está diseñado para una sola celda o estación base (BS) donde coexisten tanto los dispositivos MTC como HTC. El tráfico MTC utilizará el modelo descrito en la especificación [4], que sigue una distribución Beta de parámetros (3,4) durante 10 segundos. Para el tráfico HTC se tomaron como referencia los estudios [24] [25], en donde describen que el tráfico HTC sigue una distribución uniforme a lo largo del tiempo, dicho tráfico se basa en datos proporcionados por el registro de detalles de llamada (*Call Detail Records*, CDR) otorgado por la compañía de telecomunicaciones “Telecom Italia”, cuya tasa promedio de llegadas de solicitudes de acceso por segundo fue de 55 durante un periodo de tiempo de 10 minutos que se tomaron los datos. Por ello en este estudio asumen que el valor de tráfico obtenido tras el procesamiento se mantendrá constante durante periodos de 10 minutos. Realizando la siguiente operación matemática tomando en cuenta la tasa promedio de llegada de solicitudes de acceso por segundo y el periodo de tiempo que se realizó las pruebas dará como resultado un total de tráfico de $(55*60*10 = 33000)$ dispositivos HTC en cada periodo de prueba. El procedimiento que se seguirá para el análisis previo está contemplado en cinco bloques tal y como se describe en la **Figura 10**. Los principales parámetros de configuración del RACH se contemplan en la **Tabla 2**.

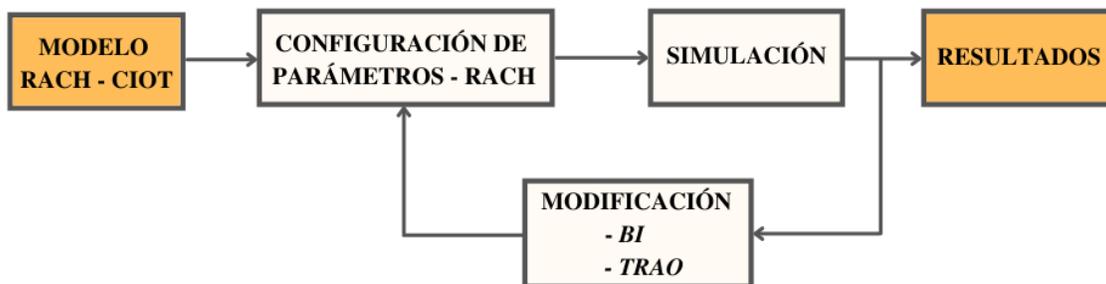


Figura 10. Procedimiento para análisis y obtención de resultados.

Fuente: Autor

Tabla 2. Configuración de los parámetros de RACH

Fuente: Autor

Parámetros	Configuración
Número total de dispositivos MTC (N_M)	10000, 15000, 20000, 25000, 30000
Número total de dispositivos HTC (N_H)	33000
Configuración del Índice del PRACH (<i>prach-ConfigIndex</i>)	6, 14
Periodicidad de RAOs (T_{RAO})	5 ms, 1 ms
Longitud de Subtrama (<i>Subframe length</i>)	1 ms
Preámbulos reservados para el RAP basado en contención (M)	54
Tamaño de ventana de RAR (W_{RAR})	5 subtramas
Máximo número de Uplink grants por subtrama (N_{RAR})	3
Máximo número de intentos de transmisiones de preámbulos (k_{max})	10
Indicador de Backoff (BI)	(20 a 960 ms) variable
Temporizador de Resolución de Contienda	48 subtramas

3.5.1. PROCEDIMIENTO

1. Realizar una revisión sistemática de literatura referente a RAP basado en contención, CIoT, sistema de comunicaciones MTC y tiempo de *backoff* como técnica de control de colisiones.
2. Desarrollar un modelo analítico y configurable en base a los parámetros del RACH para analizar y evaluar el comportamiento del RAP basado en contención mediante Matlab.
3. Implementar mediante líneas de código el modelo analítico desarrollado.
4. Configurar los parámetros del RACH descritos en la **Tabla 2** para cada escenario de tráfico.
5. Realizar la simulación una vez configurado los parámetros del RACH, para cada simulación se utilizará diferentes valores de BI empezando por su valor más bajo que

se emplea en la mayoría de los estudios realizados (20 ms) hasta llegar a su máximo valor (960 ms) conservando un mismo escenario de tráfico y un mismo valor de T_{RAO} .

6. Tabular los resultados obtenidos en cada simulación.
7. Realizar nuevamente el proceso cinco y seis conservando un mismo valor de T_{RAO} , pero utilizando un escenario de tráfico masivo diferente, esto se seguirá realizando hasta llegar al escenario de tráfico crítico (30000 dispositivos MTC) con el fin de generar diversos resultados en cada caso.
8. Realizar nuevamente los procesos del cinco al siete considerando otro valor de T_{RAO} .
9. En base a los resultados generados con respecto a las métricas de rendimiento se evaluará y se caracterizará dichos resultados mediante la determinación de un rango óptimo de BI que debería cumplir con las siguientes condiciones de fiabilidad: una $P_s \geq 0.75$ cuando se emplea un $T_{RAO} = 5\text{ ms}$ y una $P_s \geq 0.85$ cuando se emplea un $T_{RAO} = 1\text{ ms}$, en base a estas condiciones de fiabilidad se determinaran también las otras métricas de rendimiento como el retardo en el acceso empleando el percentil 95 y el número promedio de transmisiones de preámbulos necesarias para obtener un acceso satisfactorio.

3.5.2. MODELO DEL SISTEMA

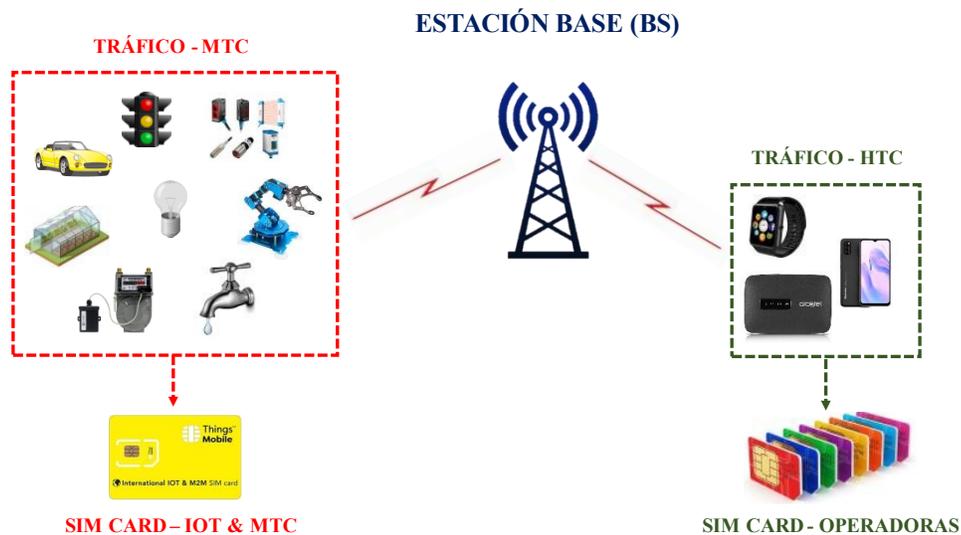


Figura 11. Descripción del modelo del sistema.

Fuente: Autor

En el presente proyecto se considera una sola BS, que atiende a un gran número de dispositivos tanto de tipo máquina (MTC) como de tipo humano (HTC), que se han registrado previamente en la BS. También se supone que cada uno de los dispositivos tienen incorporado una tarjeta SIM con el propósito que los dispositivos (MTC & HTC) se conecten directamente sin ninguna puerta de enlace (*gateway*) a la estación base, tal y como se ilustra en la **Figura 11**.

3.5.3. DIAGRAMA SECUENCIAL DEL RAP

Para el desarrollo del script en Matlab del RAP basado en contención, se debe considerar una estructura ordenada y adecuada para la lógica del procedimiento en cada uno de los pasos, tal y como se ilustra en la **Figura 3**, de tal forma que se puedan obtener datos óptimos al variar el valor del BI , el número de dispositivos MTC y el valor de T_{RAO} para las diferentes métricas de rendimiento considerando tráfico HTC de fondo para simular un entorno real y así poder analizar cada uno de los resultados obtenidos mediante simulación.

3.5.4. PASO 1 - TRANSMISIÓN DEL PREÁMBULO

Antes de iniciar el RAP basado en contención, primero se deben configurar los parámetros del RACH que se describen en la **Tabla 2** y se inicializa en cero la variable k que nos permitirá llevar un control por medio de un contador para el número máximo de intentos de transmisión de preámbulos antes de desechar la solicitud de acceso de un dispositivo. La **Figura 12** describe el procedimiento a seguir para la transmisión de preámbulo, donde el dispositivo lo elige al azar y lo transmite en un RAO disponible a través de PRACH, además en dicho paso se asigna un identificador temporal denominado RA-RTNI (*Random Access - Radio Network Temporary Identifier*) que permite identificar en el próximo paso que recurso de tiempo y frecuencia fue utilizado por el preámbulo elegido por el dispositivo. Se puede dar el caso de que múltiples dispositivos elijan el mismo preámbulo con lo que tendrán el mismo identificador temporal RA-RNTI y esto originaría una colisión, por ello los dispositivos colisionados en el próximo paso tendrán que someterse al procedimiento de *backoff* para un nuevo intento en el RAP tomando en cuenta el número máximo de intento permitidos (k_{max}).

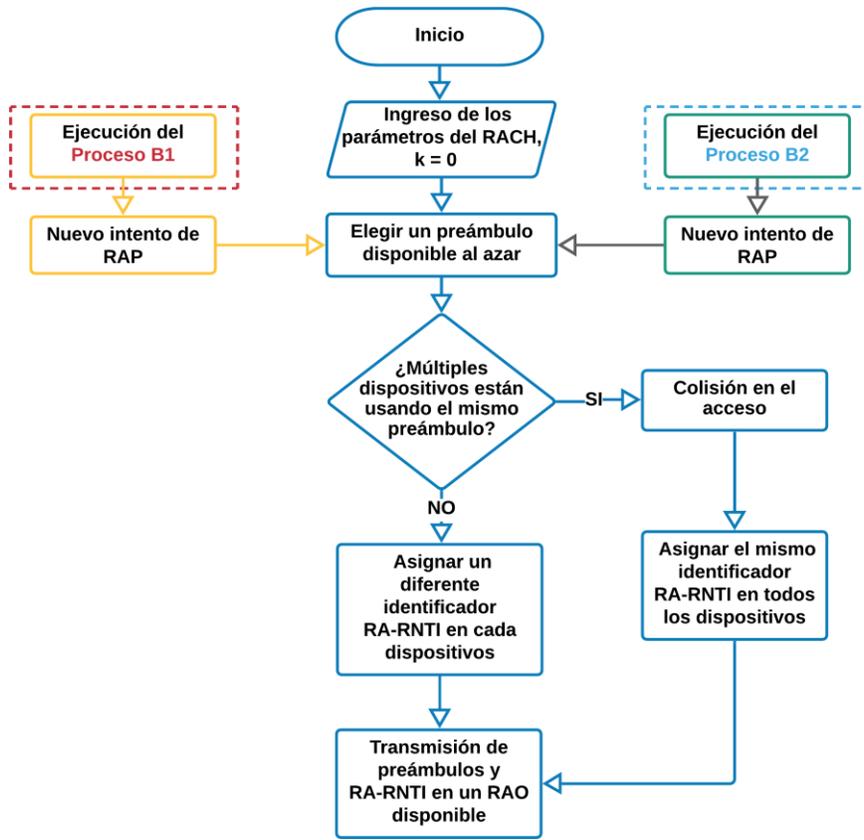


Figura 12. Descripción del procedimiento del paso 1 en el RAP basado en contención.

Fuente: Autor

3.5.5. PASO 2 - RESPUESTA DE ACCESO ALEATORIO (RAR)

Una vez que se detectan los preámbulos transmitidos por parte de los dispositivos, se evalúa el identificador temporal RA-RNTI asignado para cada preámbulo. Si el RA-RNTI es el mismo en los preámbulos detectados indica que existió una colisión en el paso anterior y envía a los dispositivos a que se sometan al procedimiento de *backoff* (procedimiento B1) para un nuevo intento, si son diferentes se asignan una concesión de enlace ascendente (Uplink Grant), un identificador denominado C-RNTI y un tiempo de asignación que se utilizarán en siguiente paso, cabe mencionar que los recursos antes mencionados deben ser entregados dentro de un tiempo denominado ventana de respuesta de acceso aleatorio (WRAR), Tal y como se muestra en la **Figura 13**.

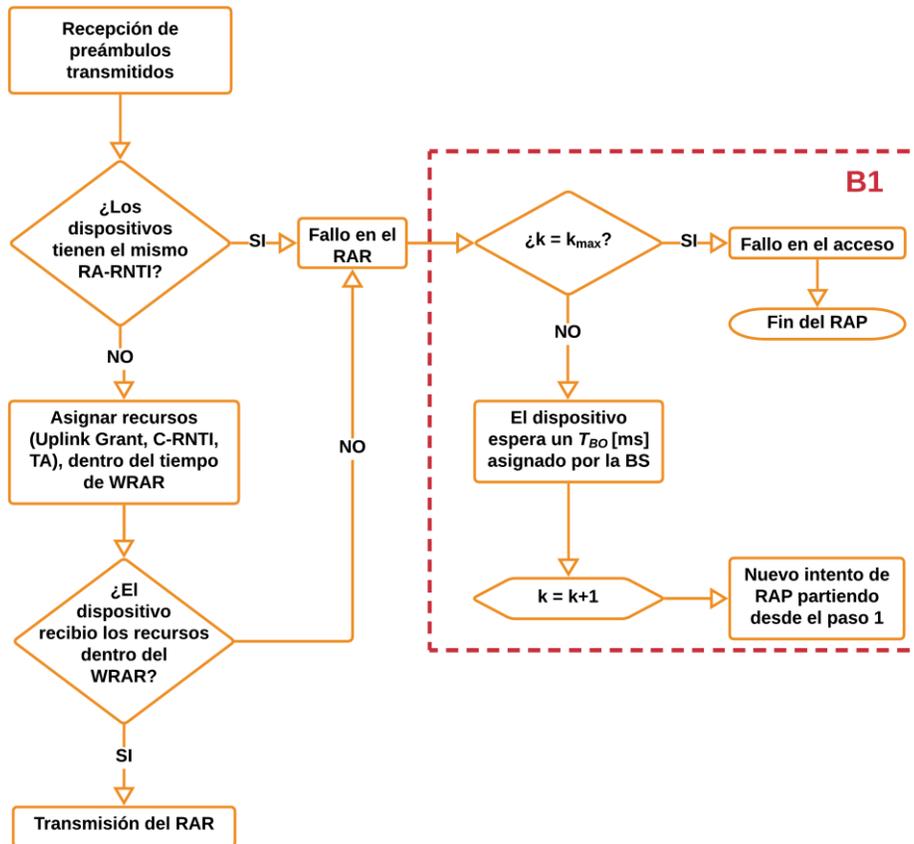


Figura 13. Descripción del procedimiento del paso 2 en el RAP basado en contención.

Fuente: Autor

3.5.6. PASO 3 - SOLICITUD DE CONEXIÓN

Una vez receptado el mensaje RAR emitido por la BS, el dispositivo hace uso de los recursos físicos de enlace ascendente asignados y garantizados en el paso anterior. Existe la posibilidad de que la BS en el paso dos decodificó correctamente los preámbulos transmitidos por múltiples dispositivos y que tienen el mismo identificador temporal RA-RNTI por ende también se le asignará los mismos recursos físicos de enlace ascendente a cada uno de los dispositivos antes mencionados provocando una colisión en el paso actual por lo cual la solicitud de conexión no podrá ser decodificada por la BS. Los dispositivos que colisionaron tendrán una identificación de dispositivo denominada C-RNTI (*Cell - Radio Network Temporary Identifier*) en la cual incluirá el valor de *BI* que utilizará en el paso siguiente para efectuar el procedimiento de *backoff*. Cabe mencionar que antes de emitir la solicitud de conexión se debe realizar primero la solicitud de

repetición automática híbrida HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*), la cual permite proteger el mensaje (solicitud de conexión) todo el proceso del paso 3 se describe en la **Figura 14**.

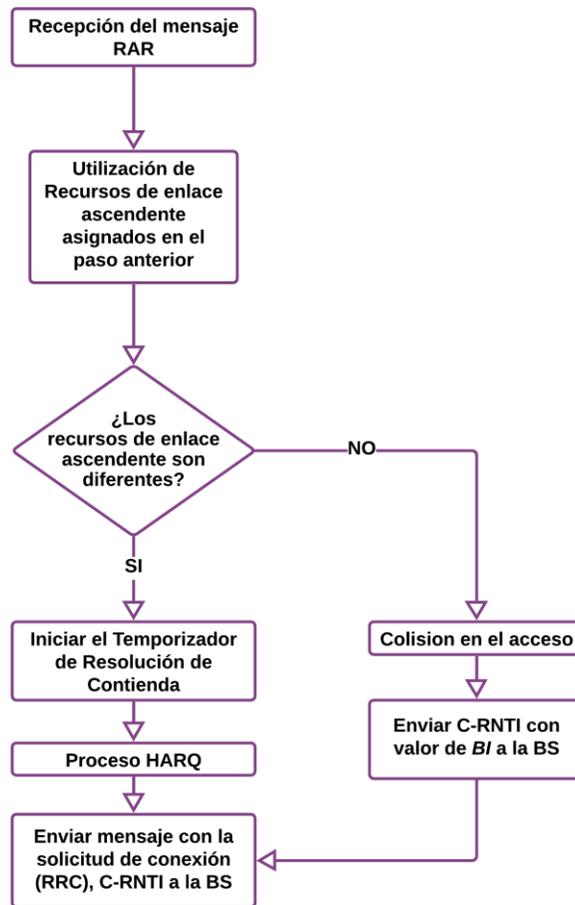


Figura 14. Descripción del procedimiento del paso 3 en el RAP basado en contención.

Fuente: Autor

3.5.7. PASO 4 - RESOLUCIÓN DE CONTIENDA

El procedimiento de este paso se describe en la **Figura 15** donde la BS recibe la solicitud de conexión y el identificador del dispositivo (C-RNTI), posteriormente procede a verificar si el C-RNTI posee algún valor de BI , si es el caso se entiende que ocurrió una colisión en el paso anterior. Los dispositivos colisionados se someten a un proceso de *backoff* (procedimiento B2) para realizar un nuevo intento considerando el máximo número de intentos permitido de preámbulos (k_{max}). En caso de que el C-RNTI no posea un valor de BI se aplica un proceso de HARQ para enviar al

dispositivo una respuesta a la solicitud denominada resolución de contienda (Msg4), cabe mencionar que en el paso anterior se activó un temporizador el cual sirve para controlar que el dispositivo obtenga el mensaje de resolución de contienda dentro del tiempo que integra dicho temporizador, si en el caso que el dispositivo no obtenga el *Msg 4*, se considera un fallo en el paso 4 y el dispositivo se tiene que someter al procedimiento de *backoff* (procedimiento B2) para un nuevo intento.

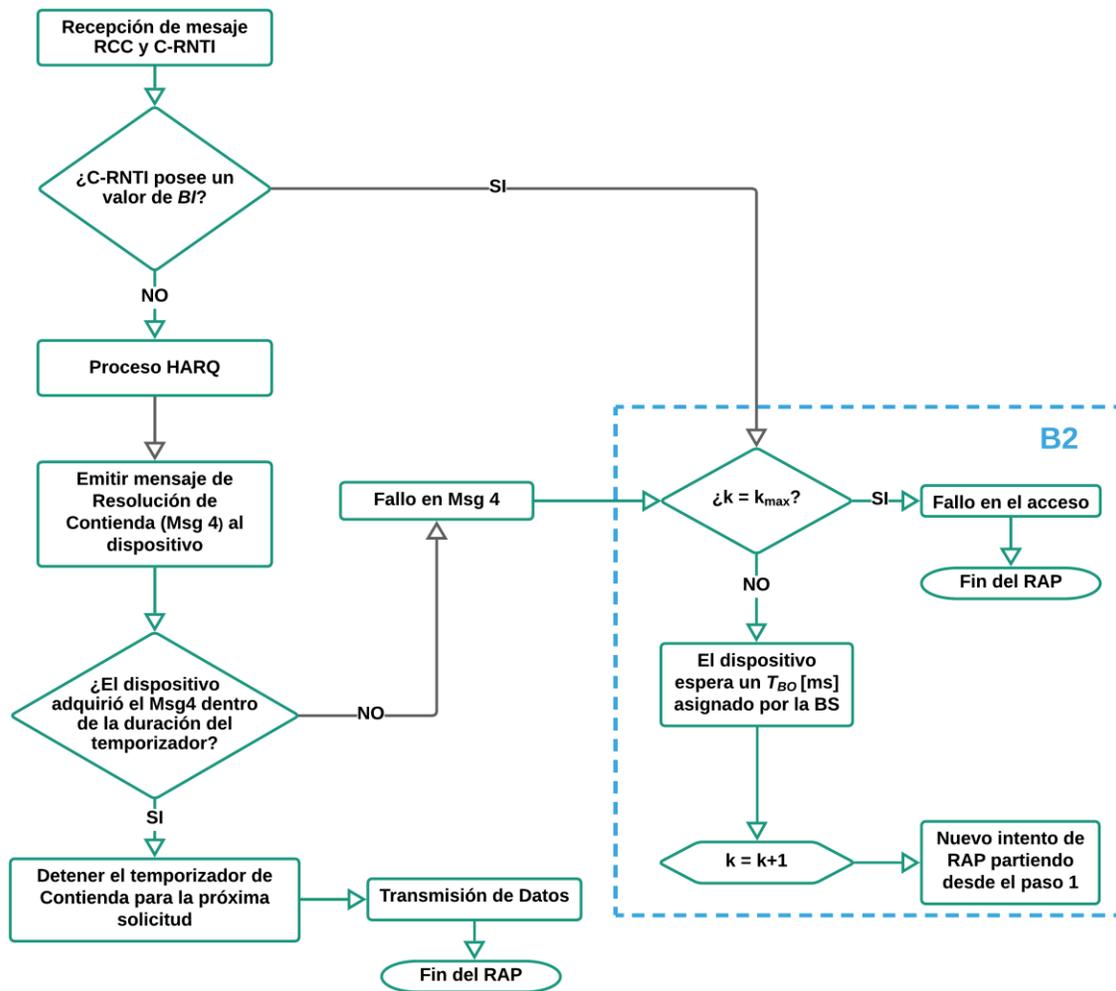


Figura 15. Descripción del procedimiento del paso 4 en el RAP basado en contención.

Fuente: Autor

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS DE LAS MÉTRICAS DE RENDIMIENTO

4.1.1. PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO (P_s)

Los resultados obtenidos en la métrica de probabilidad de acceso satisfactorio se dividirán en dos partes; la primera será cuando en el RACH se configure una periodicidad de RAOs de 5 ms ($PRACH\ configuration\ index = 6$) y la segunda cuando se configure una periodicidad de RAOs de 1 ms ($PRACH\ configuration\ index = 14$). Para estas dos configuraciones se variará los valores del BI paulatinamente en cada uno de los escenarios de tráfico masivo.

4.1.1.1. RESULTADOS CON PERIODICIDAD DE RAOs DE 5 ms

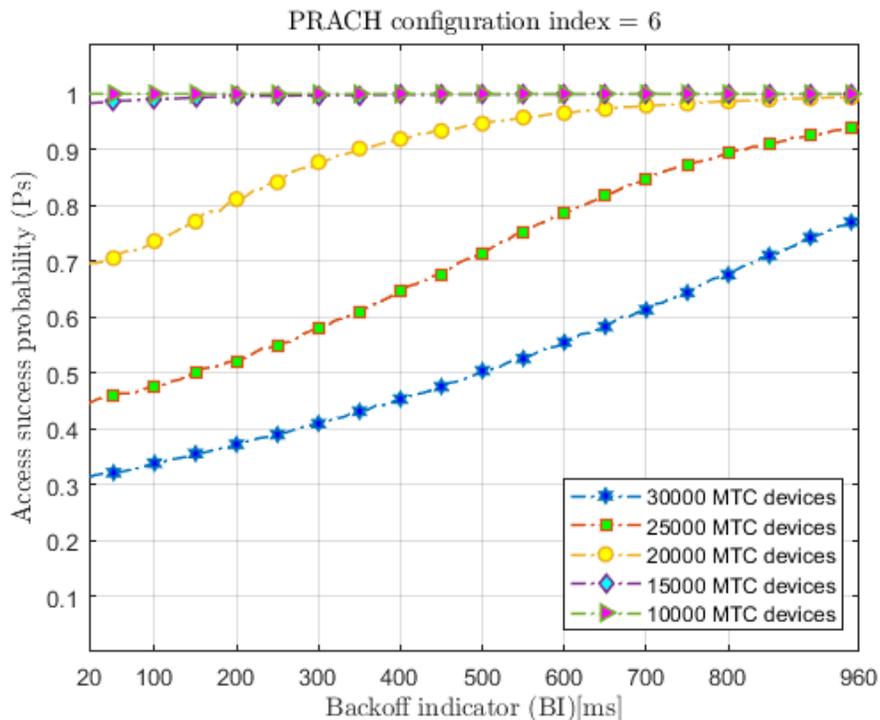


Figura 16. Probabilidad de Acceso Satisfactorio (P_s) en base a diferentes escenarios de tráfico mMTC con distintos valores de BI (20 a 960 ms) y una configuración de $T_{RAO} = 5$ ms.

Fuente: Autor

La **Figura 16** ilustra las diferentes probabilidades de acceso satisfactorio (P_s) que se generan a partir de la configuración de los parámetros del RACH descritos en la **Tabla 2**, en unos parámetros se consideran valores variables como el BI , la cantidad de dispositivos MTC que ingresan a la BS (escenarios de tráfico) y el T_{RAO} que para este caso será de 5 ms (*PRACH configuration index* = 6) el resto de los parámetros serán fijos. Para el análisis de esta métrica de rendimiento bajo los parámetros antes mencionados se tomaron valores de BI cada 10 ms. En la **Tabla 3**, **Tabla 4**, **Tabla 5**, **Tabla 6** y **Tabla 7** se muestran los resultados más relevantes tomando en cuenta el intervalo de 20 ms que se considera en la mayoría de estudios hasta el valor más alto del BI (960 ms).

Para caracterizar el impacto que se produce al variar el BI con respecto a la métrica de rendimiento P_s se tomarán en cuenta los valores que cumplan la siguiente condición de fiabilidad $P_s \geq 0.75$ cuando se emplea un $T_{RAO} = 5$ ms debido a que los valores que cumplen con lo mencionado anteriormente se consideran fiables para la transmisión de datos a partir de aquello se podrá determinar el rango óptimo de BI cuando se opere con esta configuración de periodicidad de RAOs.

Tabla 3. Resultados más relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio bajo diferentes valores de BI en un escenario de tráfico de 10000 dispositivos MTC con un valor de $T_{RAO} = 5$ ms.

Dispositivos MTC	BI (ms)	(P_s)	Dispositivos MTC	BI (ms)	(P_s)
10000	20	1	10000	200	1
10000	30	1	10000	240	1
10000	60	1	10000	320	1
10000	80	1	10000	480	1
10000	100	1	10000	560	1
10000	140	1	10000	720	1
10000	160	1	10000	960	1

Fuente: Autor

En la **Tabla 3** se muestra que al emplear un escenario de tráfico de 10000 dispositivos MTC la probabilidad de acceso satisfactorio es del 100 % para todos los valores de BI . Lo que nos indica que para este escenario de tráfico todos los dispositivos llegan a tener acceso a la red por lo que se puede considerar cualquier valor de BI ya que cumplen y sobrepasan la condición de fiabilidad.

Tabla 4. Resultados más relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio bajo diferentes valores de BI en un escenario de tráfico de 15000 dispositivos MTC con un valor de $T_{RAO} = 5$ ms.

Dispositivos MTC	BI (ms)	(P_s)	Dispositivos MTC	BI (ms)	(P_s)
15000	20	0.98	15000	250	0.99
15000	40	0.98	15000	350	0.99
15000	60	0.98	15000	450	0.99
15000	90	0.98	15000	550	0.99
15000	100	0.98	15000	750	0.99
15000	150	0.99	15000	850	0.99
15000	200	0.99	15000	960	0.99

Fuente: Autor

En la **Tabla 4** se muestra que al emplear un escenario de tráfico de 15000 dispositivos MTC la probabilidad de acceso satisfactorio es del 98 % en los primeros cinco valores a partir del sexto valor en adelante hasta llegar al máximo valor del BI es del 99 %. La observación anterior indica que para este escenario de tráfico se puede considerar también cualquier valor de BI ya que cumplen con la condición de fiabilidad.

Tabla 5. Resultados más relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio bajo diferentes valores de BI en un escenario de tráfico de 20000 dispositivos MTC con un valor de $T_{RAO} = 5$ ms.

Dispositivos MTC	BI (ms)	(P_s)	Dispositivos MTC	BI (ms)	(P_s)
20000	20	0.69	20000	350	0.90
20000	40	0.70	20000	410	0.92
20000	90	0.73	20000	580	0.96
20000	130	0.75	20000	630	0.97
20000	150	0.77	20000	720	0.98
20000	250	0.84	20000	860	0.99
20000	300	0.87	20000	960	0.99

Fuente: Autor

En la **Tabla 5** se muestra que al emplear un escenario de tráfico de 20000 dispositivos MTC la probabilidad de acceso satisfactorio que alcanza el valor más bajo de BI es del 69 % y el valor de BI^* (valor mínimo de BI que cumple con la condición de fiabilidad) para este escenario de tráfico masivo sería de 130 ms debido a que se obtuvo una probabilidad del 75 %. Para el valor máximo

del BI se obtiene una probabilidad del 99 %, es decir la BS podría elegir aleatoriamente valores de BI que se encuentren en el rango de 130 a 960 ms (rango óptimo de BI).

Tabla 6. Resultados más relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio bajo diferentes valores de BI en un escenario de tráfico de 25000 dispositivos MTC con un valor de $T_{RAO} = 5$ ms.

Fuente: Autor

Dispositivos MTC	BI (ms)	(P_s)	Dispositivos MTC	BI (ms)	(P_s)
25000	20	0.44	25000	550	0.75
25000	30	0.45	25000	630	0.80
25000	60	0.46	25000	710	0.85
25000	90	0.47	25000	830	0.90
25000	160	0.50	25000	880	0.92
25000	340	0.60	25000	920	0.93
25000	480	0.70	25000	960	0.94

En la **Tabla 6** se muestra que al emplear un escenario de tráfico de 25000 dispositivos MTC la probabilidad de acceso satisfactorio que alcanza el valor más bajo de BI es del 44 % y el valor de BI^* sería de 550 ms ya que se obtiene una probabilidad del 75 %. Para el valor máximo del BI se obtiene una probabilidad del 99 % es decir que al trabajar con este escenario de tráfico masivo la BS podría elegir aleatoriamente valores de BI que se encuentren en el rango de 550 a 960 ms.

Tabla 7. Resultados más relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio bajo diferentes valores de BI en un escenario de tráfico de 30000 dispositivos MTC con un valor de $T_{RAO} = 5$ ms.

Dispositivos MTC	BI (ms)	(P_s)	Dispositivos MTC	BI (ms)	(P_s)
30000	20	0.31	30000	600	0.55
30000	40	0.32	30000	680	0.60
30000	90	0.33	30000	760	0.65
30000	110	0.34	30000	840	0.70
30000	150	0.35	30000	920	0.75
30000	280	0.40	30000	930	0.76
30000	400	0.45	30000	960	0.77

Fuente: Autor

En la **Tabla 7** se muestra que al emplear un escenario de tráfico de 30000 dispositivos MTC que es tráfico más crítico a evaluar, la probabilidad de acceso satisfactorio que alcanza el valor más bajo de BI es del 31 %, y el valor de BI^* sería de 920 ms. Para el valor máximo del BI se obtiene una probabilidad del 77 % es decir que al trabajar con este escenario de tráfico el rango óptimo de BI será de 920 a 960.

4.1.1.2. RESULTADOS CON PERIODICIDAD de RAOs DE 1 ms

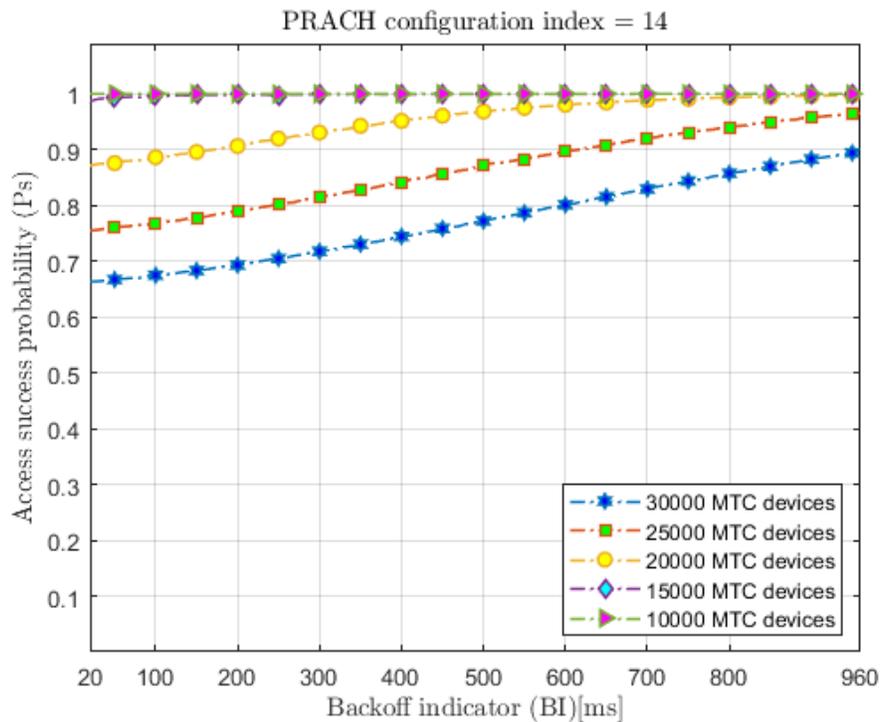


Figura 17. Probabilidad de Acceso Satisfactorio (P_s) en base a diferentes escenarios de tráfico mMTC con distintos valores de BI (20 a 960 ms) y una configuración de $T_{RAO} = 1$ ms.

Fuente: Autor

La **Figura 17** ilustra las diferentes probabilidades de acceso satisfactorio (P_s) que se generan en los diferentes escenarios de tráfico masivo al igual que en la sección 4.2.1.1 se realiza el mismo procedimiento con lo referente a la configuración de los parámetros del RACH cuya variación solo será en la configuración de periodicidad de RAOs que para este caso será de 1 ms (*PRACH configuration index = 14*). En la **Tabla 8**, **Tabla 9**, **Tabla 10**, **Tabla 11** y **Tabla 12** se muestran los resultados más relevantes tomando en cuenta el intervalo de 20 ms que se considera en la

mayoría de estudios hasta el valor más alto del BI (960 ms). Para caracterizar el impacto que se produce al variar el BI con respecto a la métrica de rendimiento (P_s) se tomarán en cuenta los valores que cumplan con la siguiente condición de fiabilidad $P_s \geq 0.85$ debido a que los valores que cumplen con dicha condición se consideran fiables para la transmisión de datos a partir de aquello se podrá determinar el rango óptimo de BI .

Tabla 8. Resultados más relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio bajo diferentes valores de BI en un escenario de tráfico de 10000 dispositivos MTC con un valor de $T_{RAO} = 1$ ms.

Dispositivos MTC	BI (ms)	(P_s)	Dispositivos MTC	BI (ms)	(P_s)
10000	20	1	10000	220	1
10000	30	1	10000	340	1
10000	40	1	10000	480	1
10000	60	1	10000	550	1
10000	80	1	10000	680	1
10000	120	1	10000	820	1
10000	180	1	10000	960	1

Fuente: Autor

Tabla 9. Resultados más relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio bajo diferentes valores de BI en un escenario de tráfico de 15000 dispositivos MTC con un valor de $T_{RAO} = 1$ ms.

Dispositivos MTC	BI (ms)	(P_s)	Dispositivos MTC	BI (ms)	(P_s)
15000	20	0.98	15000	300	0.99
15000	30	0.99	15000	350	0.99
15000	90	0.99	15000	580	1
15000	100	0.98	15000	650	1
15000	150	0.99	15000	750	1
15000	200	0.99	15000	850	1
15000	250	0.99	15000	960	1

Fuente: Autor

Tabla 10. Resultados más relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio bajo diferentes valores de BI en un escenario de tráfico de 20000 dispositivos MTC con un valor de $T_{RAO} = 1$ ms.

Dispositivos MTC	BI (ms)	(P_s)	Dispositivos MTC	BI (ms)	(P_s)
20000	20	0.87	20000	350	0.94
20000	70	0.88	20000	390	0.95
20000	130	0.89	20000	450	0.96
20000	180	0.90	20000	510	0.97
20000	220	0.91	20000	600	0.98
20000	260	0.92	20000	850	0.99
20000	300	0.93	20000	960	0.99

Fuente: Autor

Los resultados que se muestran en la **Tabla 8**, **Tabla 9** y **Tabla 10** respectivamente cumplen con la condición en todos los valores de BI al poseer una probabilidad de acceso satisfactorio mucho mayor al 85%. Estos resultados también nos indican que al emplear estos escenarios de tráfico masivo se puede trabajar con cualquier valor del BI , lo que determina un rango óptimo más amplio que contribuye al rendimiento en la red.

Tabla 11. Resultados más relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio bajo diferentes valores de BI en un escenario de tráfico de 25000 dispositivos MTC con un valor de $T_{RAO} = 1$ ms.

Dispositivos MTC	BI (ms)	(P_s)	Dispositivos MTC	BI (ms)	(P_s)
25000	20	0.75	25000	470	0.86
25000	50	0.76	25000	540	0.88
25000	170	0.78	25000	620	0.90
25000	260	0.80	25000	700	0.92
25000	330	0.82	25000	800	0.94
25000	400	0.84	25000	920	0.96
25000	440	0.85	25000	960	0.96

Fuente: Autor

En la **Tabla 11** se muestra que al emplear un escenario de tráfico de 25000 dispositivos MTC la probabilidad de acceso satisfactorio que alcanza el valor más bajo de BI es del 75 %, el valor de BI^* que cumple con la condición de fiabilidad sería de 440 ms y para el valor máximo del BI se

obtiene una probabilidad del 96 % es decir que al trabajar con este escenario de tráfico el rango óptimo de BI será de 440 a 960 ms.

Tabla 12. Resultados más relevantes de la probabilidad de acceso satisfactorio bajo diferentes valores de BI en un escenario de tráfico de 30000 dispositivos MTC con un valor de $T_{RAO} = 1$ ms.

Dispositivos MTC	BI (ms)	(P_s)	Dispositivos MTC	BI (ms)	(P_s)
30000	20	0.66	30000	600	0.80
30000	140	0.68	30000	670	0.82
30000	230	0.70	30000	670	0.82
30000	320	0.72	30000	780	0.85
30000	390	0.74	30000	820	0.86
30000	460	0.76	30000	930	0.89
30000	530	0.78	30000	960	0.89

Fuente: Autor

Por otra parte, en la **Tabla 12** se muestra que al emplear un escenario de tráfico de 30000 dispositivos MTC que es tráfico más crítico a evaluar, la probabilidad de acceso satisfactorio que alcanza el valor más bajo de BI es del 66 %, el valor de BI^* que cumple con la condición de fiabilidad sería de 780 ms y para el valor máximo del BI se obtiene una probabilidad del 89 % es decir que al trabajar con este escenario de tráfico el rango óptimo de BI será de 780 a 960 ms.

4.1.1.3. REPRESENTACIÓN GRÁFICA TRIDIMENSIONAL DE LA PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO EN FUNCIÓN DE LAS CONFIGURACIONES DE PERIODICIDAD DE RAOs

La **Figura 18** muestra una representación gráfica en tres dimensiones de la probabilidad de acceso satisfactorio para cada escenario de tráfico mMTC en función a diferentes valores de BI y distintos valores de T_{RAO} . De acuerdo con los resultados obtenidos en las distintas simulaciones realizadas se determina que en los escenarios de tráfico mMTC con menor número de dispositivos (10000 y 15000) se obtiene una $P_s \geq 0.97$ con los distintos valores de T_{RAO} , lo que indica que estos escenarios pueden utilizar todos los valores de BI ya que cumplen con las condiciones de fiabilidad antes mencionadas.

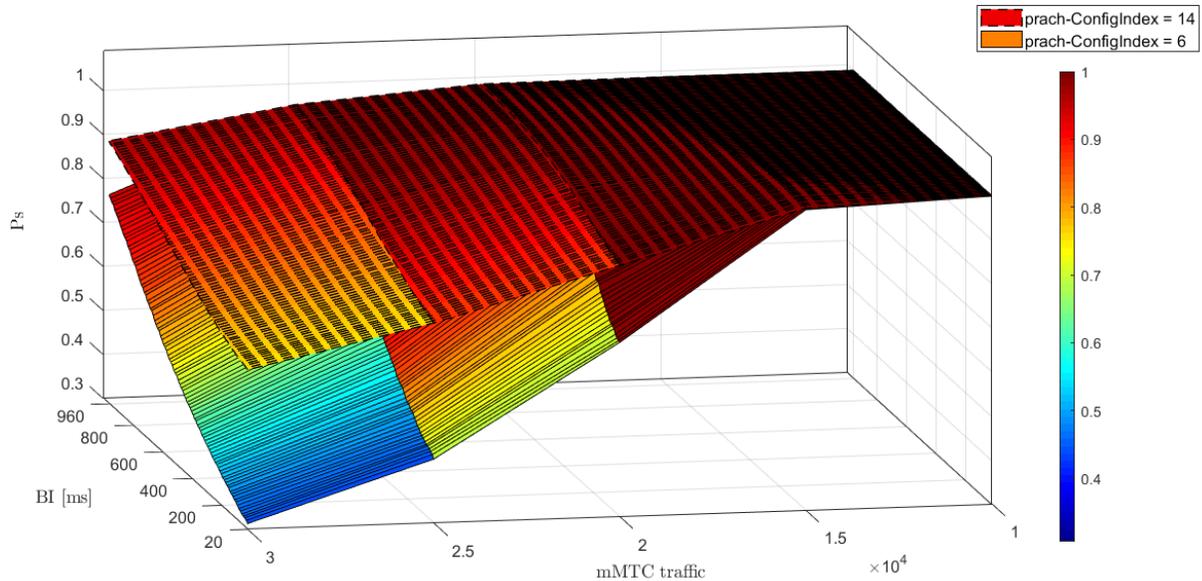


Figura 18. Probabilidad de Acceso Satisfactorio (P_s) en función de diferentes escenarios de tráfico mMTC con distintos valores de BI (20 a 960 ms) para valores de periodicidad de RAOs establecidos en 5 ms ($prach-ConfigIndex = 6$) y 1 ms ($prach-ConfigIndex = 14$).

Fuente: Autor

4.1.1.4. COMPARATIVA DE LOS VALORES MÍNIMOS DE BI QUE CUMPLEN CON LAS CONDICIONES DE FIABILIDAD EN FUNCIÓN DE LOS VALORES DE T_{RAO}

Anteriormente se mencionó acerca de las condiciones de fiabilidad que debe cumplir un determinado valor de BI para que la transmisión de datos sea integra, dichas condiciones de fiabilidad estarán en función de la periodicidad de RAOs. El valor mínimo de BI que cumple con la condición de fiabilidad se lo define como BI^* y es aquel que indica el inicio del rango óptimo del BI . En la **Figura 19** se ilustra la comparativa del BI^* al emplear las distintas configuraciones de periodicidad de RAOs en los distintos escenarios de tráfico masivo, también se observa que cuando se emplea una configuración de $prach-ConfigIndex=14$ ($T_{RAO} = 1\text{ ms}$) se tiene un rango más amplio en todos los escenarios de tráfico masivo a diferencia que cuando se emplea una configuración de $prach-ConfigIndex=6$ ($T_{RAO} = 5\text{ ms}$) que tiene un rango óptimo menor.

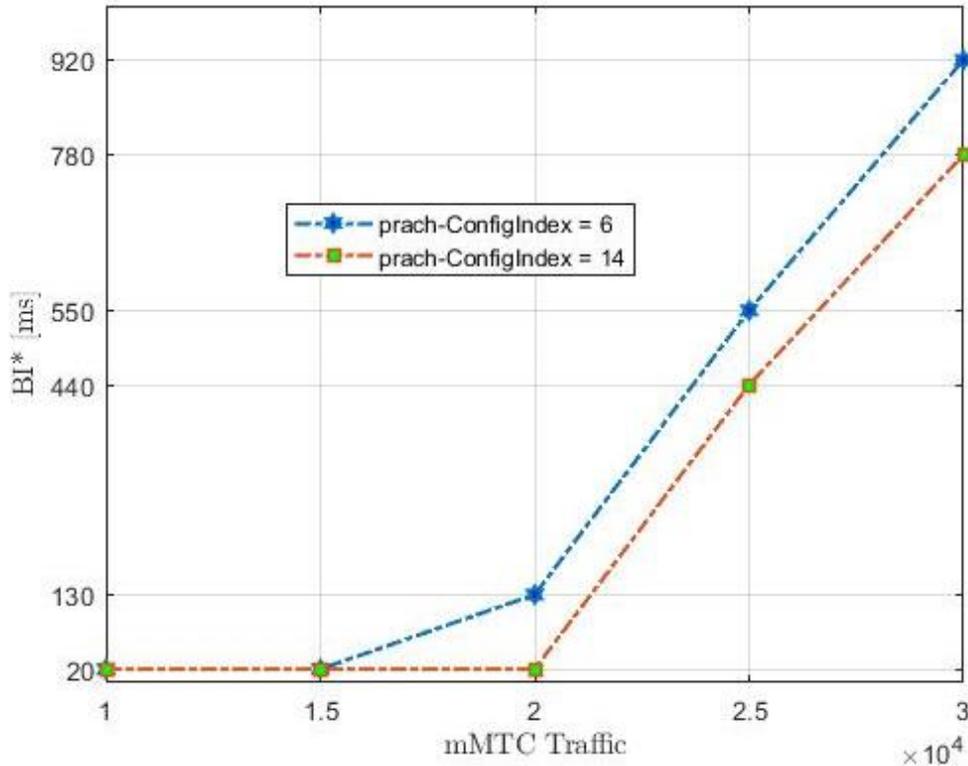


Figura 19. Comparativa de los valores de BI^* para las distintas configuraciones de periodicidad de RAOs.

Fuente: Autor

4.1.1.5. COMPARATIVA DEL TRÁFICO CRÍTICO (MTC & HTC) EN FUNCION AL TRÁFICO CRÍTICO (MTC & HTC) CON DISTINTOS VALORES DE T_{RAO}

En la **Figura 20** se muestra una comparativa en función del tráfico crítico tanto en MTC como en HTC cuando se implementan distintas configuraciones de periodicidad de RAOs. El tráfico HTC alcanza valores más altos de (P_s) , debido a que las solicitudes de acceso que llegan a la BS se distribuyen de forma uniforme y durante un intervalo de tiempo de 10 minutos a diferencia del tráfico MTC que sigue una distribución Beta de parámetros (3,4) para un intervalo de tiempo mucho menor de 10 segundo, por ello la (P_s) es más baja. Cabe mencionar que la (P_s) es proporcional a los valores de BI , es decir, a mayor valor de BI mayor será la probabilidad de acceso satisfactorio (P_s) a costa de aumentar el retardo en el acceso. Se puede apreciar también que la

configuración de periodicidad de RAOs juega un papel muy importante para la métrica (P_s) ya que con una periodicidad de 1 ms se obtienen mejores resultados.

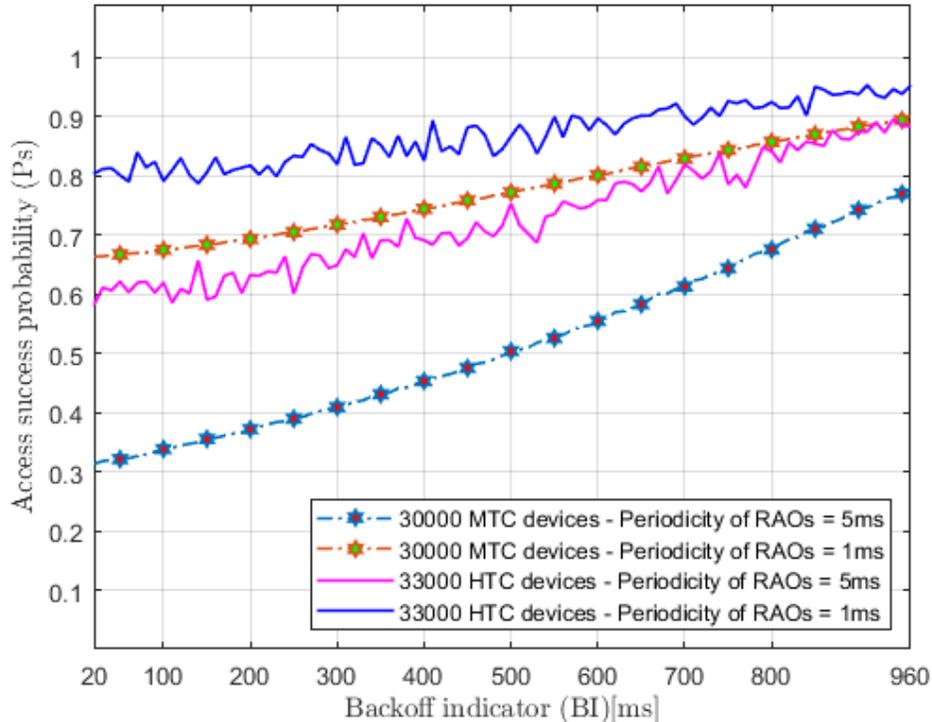


Figura 20. Comparativa de la probabilidad de acceso satisfactorio en función del tráfico crítico para comunicaciones MTC y HTC con distintas configuraciones de periodicidad de RAOs.

Fuente: Autor

4.1.2. RETARDO EN EL ACCESO (D)

Para esta métrica se consideró el uso de medidas de posición específicamente percentiles tal y como se emplea en la especificación [4] “*Study on RAN Improvements for Machine-type Communications; (Release 11)*” en donde utilizan el percentil 10 para determinar el retardo mínimo en el acceso (cuando el dispositivo logra un acceso satisfactorio en el primer intento) y el percentil 90 para determinar el máximo retardo en el acceso al evaluar tráfico masivo. Para el presente trabajo de investigación se optó por emplear el percentil 95 debido a que dicho percentil está más cerca del retardo máximo generado. No se consideró para esta métrica el uso de la media o promedio debido a la varianza que existe entre sus valores extremos que pueden ser muy altos o

bajos respecto al retardo máximo. De igual forma que la anterior métrica los resultados se dividirán en dos partes que corresponden a la configuración de periodicidad de RAOs.

4.1.2.1. RESULTADOS CON PERIODICIDAD DE RAOs DE 5 ms

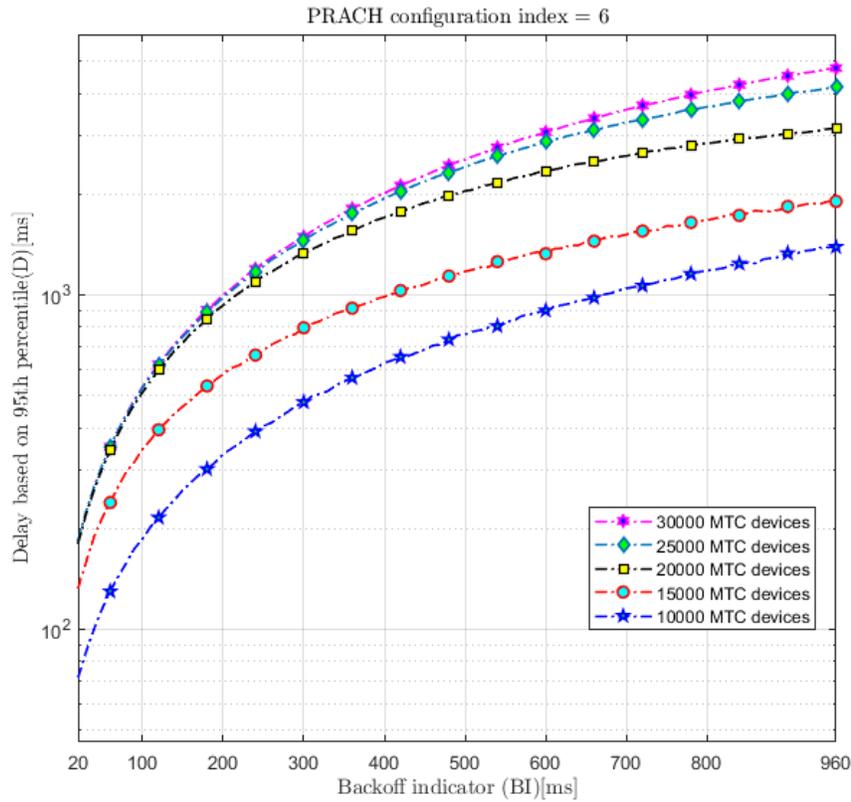


Figura 21. Retardo en el acceso (D) basado en el percentil 95 para los distintos escenarios de tráfico masivo cuando está configurado con un valor de $T_{RAO} = 5$ ms.

Fuente: Autor

En la **Figura 21** se puede apreciar los distintos resultados generados por el percentil 95 en función a los distintos escenarios de tráfico masivo y los distintos valores de BI cuando se tiene una configuración de RAOs de 5 ms. También se puede apreciar que a mayor cantidad de tráfico y a mayor BI , mayor va a ser el retardo en el acceso.

Tabla 13. Resultados del retardo en el acceso en función del rango óptimo de BI obtenido a partir del cumplimiento de la condición de fiabilidad en la métrica de (P_s) para los diferentes escenarios de tráfico mMTC con un valor de $T_{RAO} = 5 \text{ ms}$.

Escenarios de tráfico mMTC	Periodicidad de RAOs (ms)	Rango de BI óptimo (ms)	Retardo en generado en el percentil 95 (D)	
			BI^*	$BI \text{ max}$
10000	5	20 – 960	71.5 ms	1390.2 ms
15000	5	20 – 960	132.6 ms	1900.8 ms
20000	5	130 – 960	636.5 ms	3135.4 ms
25000	5	550 – 960	2641.3 ms	4169.3 ms
30000	5	920 – 960	4593.4 ms	4756.5 ms

Fuente: Autor

En la **Tabla 13** se muestran los resultados de retardo en el acceso en base al rango óptimo generado en la métrica anterior (P_s) por medio del cumplimiento de la condición de fiabilidad para la configuración de periodicidad de RAOs de 5 ms. Se puede apreciar también que en el escenario de tráfico masivo más crítico (30000 dispositivos) se genera un mayor retardo en comparación a los otros escenarios y esto se debe a que a mayor valor de BI mayor y mayor número de dispositivos mayor será el retardo generado.

4.1.2.2. RESULTADOS CON PERIODICIDAD DE RAOs DE 1 ms

En la **Figura 22** se puede apreciar los distintos resultados generados por el percentil 95 en función a los distintos escenarios de tráfico mMTC y los distintos valores de BI cuando se tiene una configuración de RAOs de 1 ms. Los resultados obtenidos son un poco más favorables en comparación que cuando se tiene una configuración de RAOs de 5 ms y esto se da porque en aquella configuración se utiliza toda la trama del PRACH generando un menor retardo y mayores oportunidades para el acceso hacia la red.

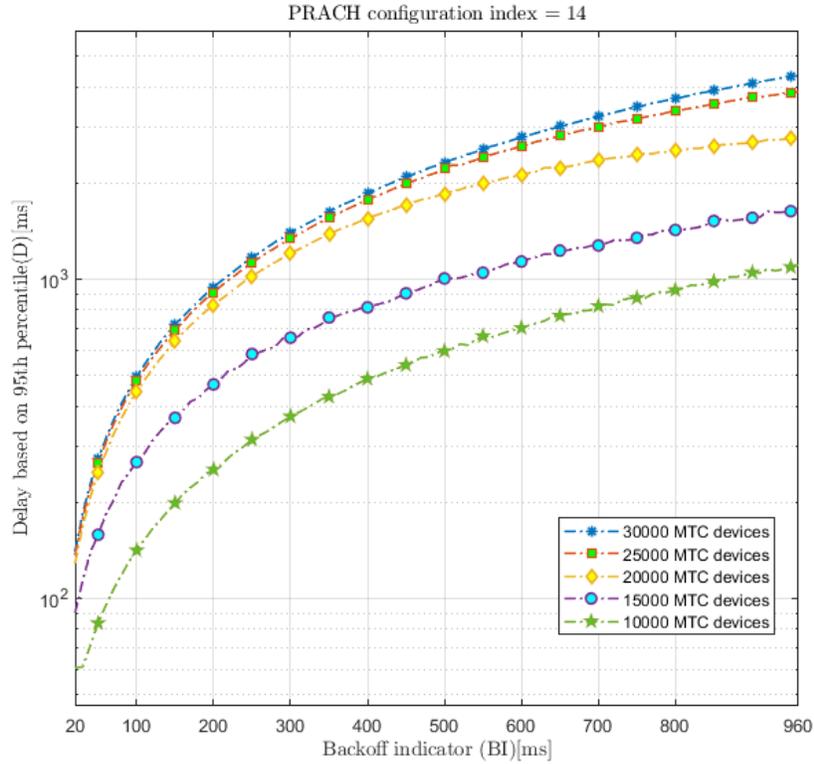


Figura 22. Retardo en el acceso (D) basado en el percentil 95 para los distintos escenarios de tráfico masivo cuando está configurado con un valor de $T_{RAO} = 1$ ms.

Fuente: Autor

Tabla 14. Resultados del retardo en el acceso en función del rango óptimo de BI obtenido a partir del cumplimiento de la condición de fiabilidad en la métrica de P_s para los diferentes escenarios de tráfico mMTC con un valor de $T_{RAO} = 1$ ms.

Escenarios de tráfico mMTC	Periodicidad de RAOs (ms)	Rango de BI óptimo (ms)	Retardo en generado en el percentil 95 (D)	
			BI*	BI max
10000	1	20 – 960	60.7 ms	1105.5 ms
15000	1	20 – 960	90.1 ms	1632.6 ms
20000	1	20 – 960	129 ms	2763.8 ms
25000	1	440 – 960	1945.6 ms	3861.5 ms
30000	1	780 – 960	3589,9 ms	4329.6 ms

Fuente: Autor

En la **Tabla 14** se muestran los resultados de retardo en el acceso en base al rango óptimo generado en la métrica anterior (P_5) por medio del cumplimiento de la condición de fiabilidad para la configuración de periodicidad de RAOs de 1 ms. Se puede apreciar también que para esta configuración se cuenta con mayores rangos de BI en comparación con la **Tabla 13** para los diferentes escenarios de tráfico masivo. Tal es el caso de los tres primeros escenarios (10000, 15000, 20000) en donde se pueden utilizar todos los valores de BI ; sin embargo, para el tráfico más crítico evaluado se tiene un menor rango que tendría un retardo en el acceso entre 3.58 segundos y 4.32 segundos, respectivamente.

4.1.2.3. REPRESENTACIÓN GRÁFICA TRIDIMENSIONAL DEL RETARDO EN EL ACCESO (D) EN FUNCIÓN DE LAS CONFIGURACIONES DE PERIODICIDAD DE RAOs

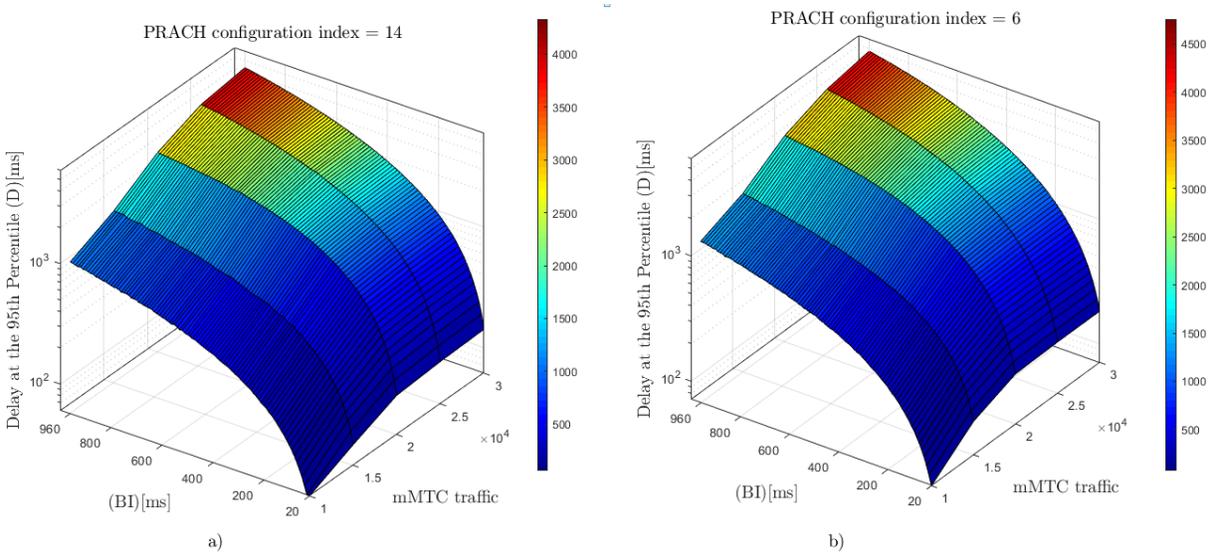


Figura 23. Representación en tres dimensiones del retardo en el acceso (D) en función de diferentes escenarios de tráfico mMTC con distintos valores de BI (20 a 960 ms).
 (a) Representación del retardo en el acceso cuando se emplea un valor de $T_{RAO} = 1$ ms.
 (b) Representación del retardo en el acceso cuando se emplea con un valor de $T_{RAO} = 5$ ms.

Fuente: Autor

En la **Figura 23** en forma general se muestra de manera un poco más detallada el comportamiento del retardo en el acceso al emplear distintos escenarios de tráfico masivo. Se observa que el retardo generado por el percentil 95 se incrementa a medida que el valor de BI es mayor también aumenta

cuando mayor es el tráfico que ingresa a la BS y esto es entendible debido que al tener un mayor tráfico y de forma masiva se generarán más colisiones en la red generando así mayor retardo en el acceso. En la **Figura 23 (a)** se puede apreciar también que se obtiene un retardo ligeramente menor en el acceso en comparación con la **Figura 23 (b)**, aunque aparentemente no pareciera mucho el cambio con lo que respecta a transmisión de datos una mejora de ms hace una gran diferencia.

4.1.3. NÚMERO PROMEDIO DE TRANSMISIONES DE PREÁMBULOS (k)

Para esta métrica se considera una media de una distribución discreta en base a la CDF obtenida en función de los resultados para diferentes escenarios de tráfico masivo y diferentes valores de BI . Los resultados generados se tienen que redondear al inmediato superior debido a que esta métrica, al tratarse de intentos de transmisión, no se podría trabajar con decimales obligatoriamente se requiere datos enteros. Cabe mencionar también que esta métrica, al igual que las anteriores, depende de un parámetro del RACH que se consideró constante en todas las simulaciones y es el parámetro (k_{max}) el cual está configurado para un máximo de diez intentos. Se optó por trabajar con este valor debido a que ha sido probado y utilizado en varios estudios realizados con diversas técnicas de control de acceso. El efecto de modificar este parámetro es el siguiente: si se coloca un valor menor de diez, se reducen considerablemente el número promedio de transmisiones de preámbulos y el retardo en el acceso tiende a bajar también, pero la probabilidad de acceso satisfactorio también baja considerablemente para los valores más altos de BI y viceversa; si se coloca un valor mayor a diez aumenta considerablemente la (P_s) pero también aumentan las demás métricas de rendimiento.

4.1.3.1. RESULTADOS CON PERIODICIDAD DE RAOs DE 5 ms

En la **Figura 24** se muestran los distintos resultados generados a partir de los distintos escenarios de tráfico mMTC empleados bajo distintos valores de BI , se considera una configuración de RAOs de 5 ms y un máximo de diez intentos de transmisión de preámbulo. También se puede apreciar que en los escenarios de tráfico masivo con un mayor número de dispositivos (30000 y 25000) el número promedio de transmisiones de preámbulo aumenta a partir de los valores de BI mayores a 260 ms.

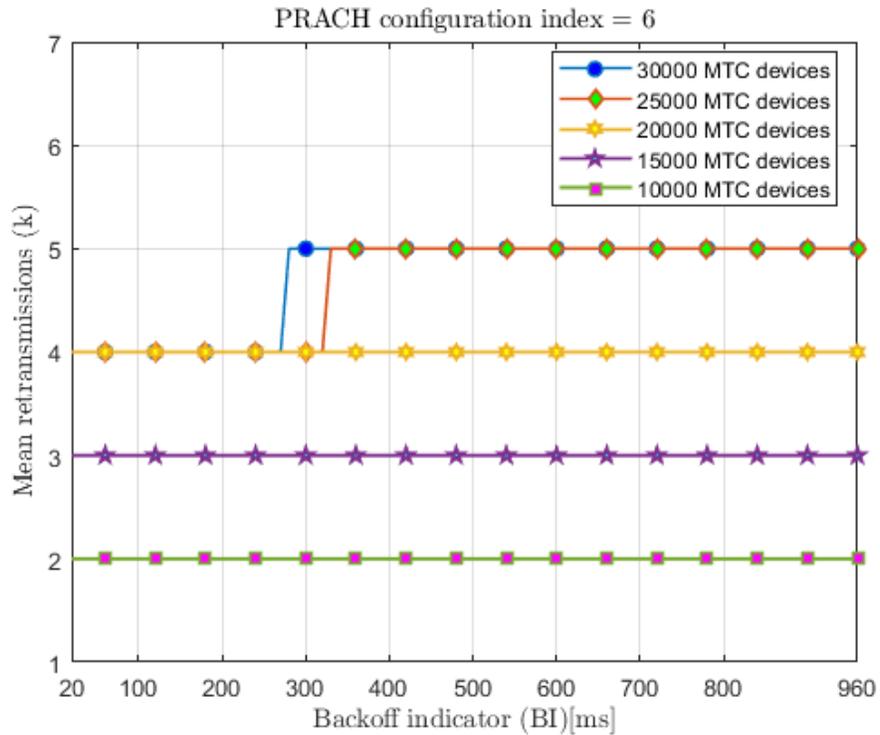


Figura 24. Promedio de transmisiones de preámbulos (k) bajo distintos escenarios de tráfico mMTC cuando está configurado con un valor de $T_{RAO} = 5$ ms y un máximo de 10 intentos de transmisión de preámbulo (k_{max}).

Fuente: Autor

Tabla 15. Resultados del promedio de transmisiones de preámbulos (k) considerando el rango de valores óptimos de BI obtenidos a partir de la P_s para las diferentes demandas de tráfico MTC con un valor de $T_{RAO} = 5$ ms y un máximo de 10 intentos de transmisión de preámbulo (k_{max}).

Escenarios de tráfico mMTC	Periodicidad de RAOs (ms)	Rango de BI óptimo (ms)	Número promedio de transmisión de preámbulos (k)	
			BI*	BI max
10000	5	20 – 960	2	2
15000	5	20 – 960	3	3
20000	5	130 – 960	4	4
25000	5	550 – 960	5	5
30000	5	920 – 960	5	5

Fuente: Autor

4.1.3.2. RESULTADOS CON PERIODICIDAD DE RAOs DE 1 ms

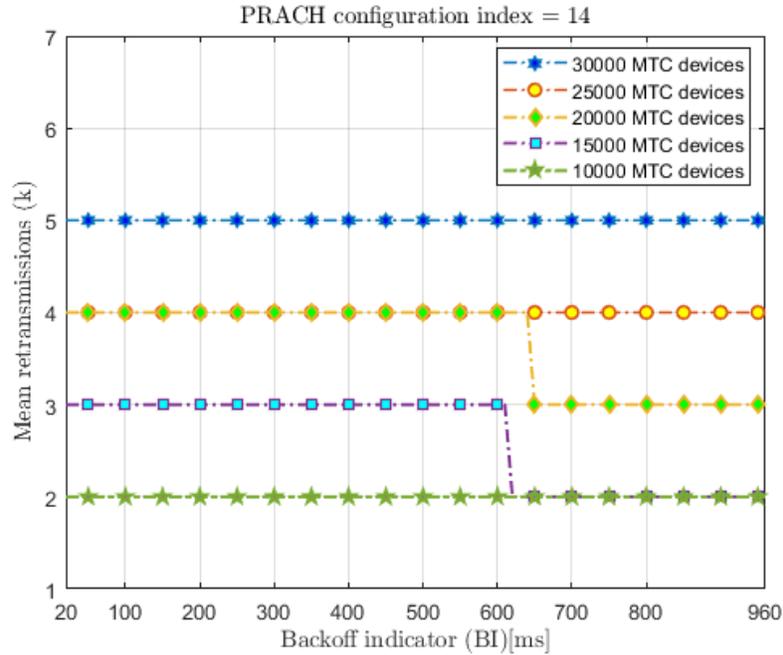


Figura 25. Promedio de transmisiones de preámbulos (k) bajo distintos escenarios de tráfico mMTC cuando está configurado con un valor de $T_{RAO} = 1$ ms y un máximo de 10 intentos de transmisión de preámbulo (k_{max}).

Fuente: Autor

En la **Figura 25** se muestran los distintos resultados generados a partir de los distintos escenarios de tráfico mMTC empleados bajo distintos valores de BI , se considera una configuración de RAOs de 1 ms y un máximo de diez intentos de transmisión de preámbulo. También se puede apreciar que, para los escenarios de tráfico masivo de 30000, 25000 y 10000 dispositivos respectivamente el número promedio de transmisiones de preámbulo es constante para todos los valores de BI a diferencia de los escenarios de 20000 y 15000 dispositivos respectivamente, en los valores de BI mayores a 600 ms el número promedio de transmisiones de preámbulo baja. En la **Tabla 16** se muestran los resultados de retardo en el acceso en base al rango óptimo generado en la métrica anterior (P_S) por medio del cumplimiento de la condición de fiabilidad para la configuración de periodicidad de RAOs de 1 ms.

Tabla 16. Resultados del promedio de transmisiones de preámbulos (k) considerando el rango de valores óptimos de BI obtenidos a partir de la P_s para las diferentes demandas de tráfico MTC con un valor de $T_{RAO} = 1$ ms y un máximo de 10 intentos de transmisión de preámbulo (k_{max}).

Escenarios de tráfico mMTC	Periodicidad de RAOs (ms)	Rango de BI óptimo (ms)	Número promedio de transmisión de preámbulos (k)	
			BI^*	BI max
10000	1	20 – 960	2	2
15000	1	20 – 960	3	2
20000	1	20 – 960	4	3
25000	1	440 – 960	4	4
30000	1	780 – 960	5	5

Fuente: Autor

4.1.3.3. REPRESENTACIÓN GRÁFICA TRIDIMENSIONAL DEL NÚMERO PROMEDIO DE TRANSMISIONES DE PREÁMBULOS (k) EN FUNCIÓN DE LAS CONFIGURACIONES DE PERIODICIDAD DE RAOs

En la **Figura 26** en forma general se muestra de manera un poco más detallada como se distribuye el número promedio de transmisiones de preámbulo para los diferentes escenarios de tráfico masivo. Se observa también que a mayor tráfico mayor será el número de intentos de transmisión de preámbulos necesarios en promedio para que los dispositivos completen satisfactoriamente el RAP. En la **Figura 26 (a)** se puede apreciar que para los dos escenarios de tráfico masivo con mayor número de dispositivos el valor de k aumenta a partir de los valores de BI mayores a 270 ms en comparación con la **Figura 26 (b)**, que para los mismos escenarios de tráfico el valor de k es constante para todos los valores de BI y para los escenarios de tráfico de 20000 y 15000 dispositivos, respectivamente, el valor de (k) baja a partir de los valores de BI mayores a 600 ms.

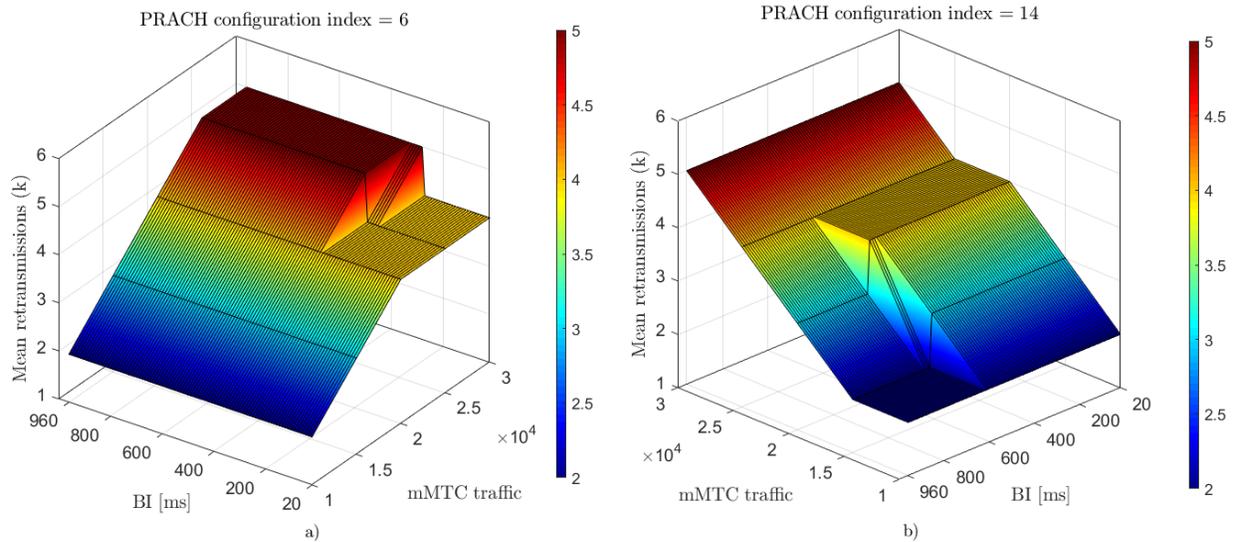


Figura 26. Representación en tres dimensiones del número promedio de transmisiones de preámbulos (k) en función de diferentes escenarios de tráfico mMTC con distintos valores de BI (20 a 960 ms). (a) Representación del retardo en el acceso cuando se emplea un valor de $T_{RAO} = 5$ ms (b) Representación del retardo en el acceso cuando se emplea un valor de $T_{RAO} = 1$ ms .

Fuente: Autor

4.2. COMPARATIVA DE LAS DISTINTAS MÉTRICAS DE RENDIMIENTO PARA LOS DIFERENTES ESCENARIOS EN FUNCIÓN AL RANGO DE BI ÓPTIMO DETERMINADO

Al integrar los resultados obtenidos en las diferentes métricas evaluadas y dividiéndolos en base a la configuración de periodicidad del RAOs empleada se podrá tener un punto de referencia más claro en cuanto a la elección de la configuración de periodicidad de RAOs que más convenga. Al caracterizar el impacto que genera el BI y analizar sus valores que cumple con las condiciones de fiabilidad en ambas configuraciones de periodicidad se determina el rango óptimo de operación mediante dicho rango se puede cumplir los que indican los estándares 3GPP, en donde la BS podrá elegir valores alzar dentro del rango óptimo determinado. En la **Tabla 17** y la **Tabla 18** se muestran los resultados ya organizados en función a la configuración de periodicidad de RAOs, rango óptimo y las métricas de rendimiento.

Tabla 17. Descripción de los resultados obtenidos en base al rango de BI óptimo para las distintas métricas cuando se emplea un valor de $T_{RAO} = 5$ ms .

Escenarios de tráfico mMTC	Periodicidad de RAOs (ms)	Rango de BI óptimo (ms)	(P_s)		(D)		(k)	
			BI^*	BI_{max}	BI^*	BI_{max}	BI^*	BI_{max}
10000	5	20 – 960	0.99	1	71.5 ms	1390.2 ms	2	2
15000	5	20 – 960	0.98	1	132.6 ms	1900.8 ms	3	3
20000	5	130 – 960	0.75	0.99	636.5 ms	3135.4 ms	4	4
25000	5	550 – 960	0.75	0.94	2641.3 ms	4169.3 ms	5	5
30000	5	920 – 960	0.75	0.77	4593.4 ms	4756.5 ms	5	5

Fuente: Autor

Tabla 18. Descripción de los resultados obtenidos en base al rango de BI óptimo para las distintas métricas cuando se emplea un valor de $T_{RAO} = 1 \text{ ms}$.

Escenarios de tráfico mMTC	Periodicidad de RAOs (ms)	Rango de BI óptimo (ms)	(P_s)		(D)		(k)	
			BI^*	BI_{max}	BI^*	BI_{max}	BI^*	BI_{max}
10000	1	20 – 960	1	1	60.7 ms	1105.5 ms	2	2
15000	1	20 – 960	0.98	1	90.1 ms	1632.6 ms	3	2
20000	1	20 – 960	0.87	0.99	129 ms	2763.8 ms	4	3
25000	1	440 – 960	0.85	0.96	1945.6 ms	3861.5 ms	4	4
30000	1	780 – 960	0.85	0.89	3589.9 ms	4329.6 ms	5	5

Fuente: Autor

4.3. ANÁLISIS INFERENCIAL (PRUEBA DE HIPÓTESIS)

Para este apartado se partirá de dos configuraciones en función a dos parámetros importantes del RACH (BI y T_{RAO}) aplicados a un determinado escenario de tráfico masivo, la primera configuración será nuestro punto de partida para formular la hipótesis opuesta (H_0) donde dicha configuración estará basada en una configuración típica que se emplea en la mayoría de estudios y la segunda configuración estará basada en un valor mínimo de BI que cumple con la condición de fiabilidad, la misma servirá para formular la hipótesis alterna (H_1). Se trabajará con los valores medios de las diferentes métricas de rendimiento en función a un número determinado de simulaciones y se realizará una prueba de hipótesis para cada una de ellas. Se trabajará con un

nivel de significancia del 5 % y se empleará un estadístico de prueba “t-student” descrito en [23], en la **Figura 27** se ilustra el algoritmo para determinar las distintas pruebas de hipótesis.

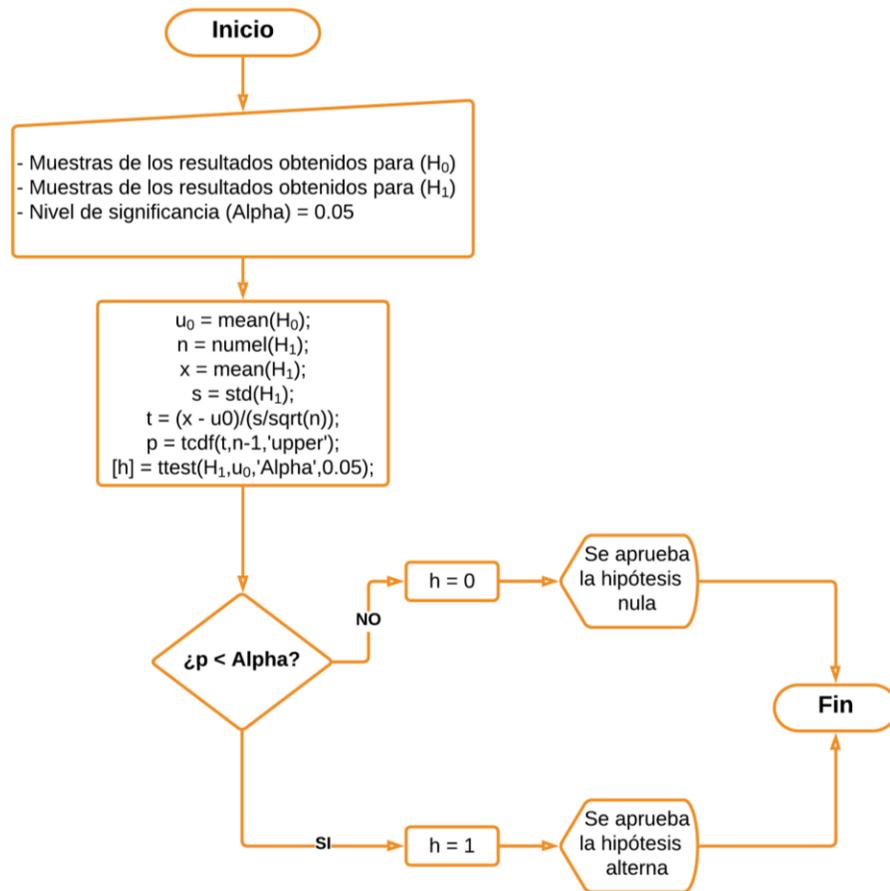


Figura 27. Algoritmo para efectuar las pruebas de hipótesis mediante el software Matlab.

Fuente: Autor

Para este análisis se utilizó el modelo de tráfico masivo más crítico (30000 dispositivos MTC), luego, se definieron dos configuraciones en función a dos parámetros importantes del RACH (BI y T_{RAO}) la primera una configuración denominada nominal que fue nuestro punto de partida para formular nuestra hipótesis opuesta (H_0) cuyos parámetros fueron de $BI = 20\ ms$ y $T_{RAO} = 5\ ms$ y la segunda configuración denominada óptima que fue nuestra propuesta cuyos parámetros fueron de $BI = 780\ ms$ y $T_{RAO} = 1\ ms$, los mismos que están basados en torno a la condición de fiabilidad del 85%. Por último, en torno a las dos configuraciones antes mencionadas y el escenario

de tráfico masivo elegido se efectuó un número de 100 simulaciones con el fin de determinar las medias de las diferentes métricas de rendimiento los resultados se aprecian en la **Tabla 19**.

Tabla 19. Resultados obtenidos de las medias en función a las diferentes métricas de rendimiento

	$\mu(P_s)$	$\mu(D)$	$\mu(k)$
Configuración nominal	0.3075	182.62 ms	3.4587
Configuración óptima	0.8508	3690.3 ms	4.1811

Fuente: Autor

Para la prueba de hipótesis se consideró un nivel de significancia denominado “ α ” con un valor igual a 0.05. Se consideró también un estadístico de prueba “t-student” y para la toma de decisión se la realizo en base al valor “p” obtenido utilizando Matlab mediante la función “ttest” que viene incorporada. Este valor permite conocer cuando se aprueba o se rechaza hipótesis nula mediante el parámetro “h”, es decir, cuando $h = 1$ se rechaza la hipótesis nula y cuando $h = 0$ se acepta la hipótesis nula.

4.3.1. PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA LA VARIABLE DE PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO (P_S)

- $H_0: \mu(P_s^*) = \mu(P_s)$ la probabilidad de acceso satisfactoria óptima (P_s^*) es igual a la probabilidad de acceso satisfactorio nominal (P_s).
- $H_1: \mu(P_s^*) > \mu(P_s)$ la probabilidad de acceso satisfactoria óptima (P_s^*) es mayor a la probabilidad de acceso satisfactorio nominal (P_s).
- $\alpha = 0.05$ (Nivel de significancia).
- Estadístico de prueba: t-student.
- Formulación para regla de la decisión: una cola a la derecha.

Tabla 20. Resultados de los parámetros de la prueba de hipótesis para la variable de probabilidad de acceso satisfactorio (P_S).

μ_0	0.3075
\bar{x}	0.8508
s	0.0017
n	100
p	$9.716 * 10^{-250}$
h	1

Fuente: Autor

En la **Tabla 20** se observa que el valor “p” es menor al nivel de significancia “ α ” por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna ya que la probabilidad de acceso satisfactorio generada por la configuración óptima es mayor a la probabilidad de acceso satisfactorio generada por la configuración nominal, al 95 % de confianza.

4.3.2. PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA LA VARIABLE DE RETARDO EN EL ACCESO (D)

- $H_0: \mu(D^*) \leq \mu(D)$ el retardo en el acceso óptimo (D^*) es menor o igual al retardo en el acceso nominal (D).
- $H_1: \mu(D^*) > \mu(D)$ el retardo en el acceso óptimo (D^*) es mayor al retardo en el acceso nominal (D).
- $\alpha = 0.05$ (Nivel de significancia).
- Estadístico de prueba: t-student.
- Formulación para regla de la decisión: una cola a la derecha.

En la **Tabla 21**, se observa que el valor “p” es menor al nivel de significancia “ α ” por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna debido a que el retardo generado en el acceso empleando la configuración óptima es sumamente mayor al retardo generado empleando la configuración nominal, al 95% de confianza.

Tabla 21. Resultados de los parámetros de la prueba de hipótesis para la variable del retardo en el acceso (D).

μ_0	182.62 ms
\bar{x}	3690.3 ms
s	18.3992
n	100
p	$4.4066 * 10^{-228}$
h	1

Fuente: Autor

4.3.3. PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA LA VARIABLE DEL NÚMERO PROMEDIO DE TRANSMISIONES DE PREÁMBULOS (k)

- $H_0: \mu(k^*) \leq \mu(k)$ el número promedio de transmisiones de preámbulo óptima (k^*) es menor o igual al número promedio de transmisiones de preámbulo nominal (k).
- $H_1: \mu(k^*) > \mu(k)$ el número promedio de transmisiones de preámbulo óptima (k^*) es mayor al número promedio de transmisiones de preámbulo nominal (k).
- $\alpha = 0.05$ (Nivel de significancia).
- Estadístico de prueba: t-student.
- Formulación para regla de la decisión: una cola a la derecha.

Tabla 22. Resultados de los parámetros de la prueba de hipótesis para la variable del número promedio de transmisiones de preámbulos (k).

μ_0	3.4587
\bar{x}	4.1811
s	0.0165
n	100
p	$6.6802 * 10^{-165}$
h	1

Fuente: Autor

En la **Tabla 22**, se observa que el valor “p” es menor al nivel de significancia “ α ” por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna ya que el número promedio de transmisiones de preámbulos obtenidos por la configuración óptima es mayor al número promedio de transmisiones de preámbulos obtenido por la configuración nominal, al 95 % de confianza.

4.3.4. DECISIÓN DE RESULTADOS

En la sección anterior se determinó que al emplear una configuración óptima en comparación con una configuración nominal mejoramos la probabilidad de acceso satisfactorio en un 63.84 % lo que conlleva a tener una comunicación fiable. Sin embargo, al aumentar la probabilidad de acceso satisfactorio se incrementa tanto el retardo en el acceso como el número de transmisiones de preámbulos siendo estos aumentos de alrededor del 95.05 % para el retardo en el acceso basados en el percentil 95 y del 17.28 % para el número promedio de transmisiones de preámbulos. El hecho de tener una comunicación fiable para la transmisión de información requiere sacrificar considerablemente el retardo en el acceso, por ello que el implementar solo el procedimiento de *backoff* sin ninguna técnica de control adicional, solo permitirá ser utilizado para aplicaciones tolerantes al retardo como smart meters, smart grid, smart industry, smart city. Dichas aplicaciones están contempladas en las denominadas redes tolerantes a retardo (*Delay Tolerant Networks, DTN*) el lector interesado puede consultar [26] para obtener más detalles.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Como tal, se estudió el procedimiento de *backoff* como técnica de control para lidiar con las colisiones que se originan en el RACH al tener tráfico masivo y se exploró además el impacto que se produce al variar el indicador de *backoff* en relación con la configuración de la periodicidad de RAOs para los distintos escenarios de tráfico masivo a evaluar. Asumimos que la probabilidad de acceso satisfactorio es la principal métrica de rendimiento; por lo tanto, primero nos enfocamos en caracterizar los valores de *BI* que cumplan con las condiciones de fiabilidad para ambas configuraciones de periodicidad de RAOs, de tal manera de obtener un rango óptimo de *BI* para cada escenario de tráfico masivo que permitirá dar cumplimiento a lo indicado en los estándares 3GPP correspondiente a la elección aleatoria de un tiempo de *backoff*.
- Se concluye que, para los escenarios de tráfico masivo de 10000 y 15000 dispositivos MTC se puede implementar cualquiera de las dos configuraciones de periodicidad de RAOs, ya que ambos casos se obtienen una $P_s \geq 0.98$, mientras que para los demás escenarios de tráfico masivo conviene utilizar más la configuración de periodicidad de RAOs de 1 ms ya que posee un rango de *BI* óptimo mayor y una $P_s \geq 0.85$.
- En referencia al retardo basado en el percentil 95 D (ms) cuando se opera con una configuración de periodicidad de RAOs de 5 ms y evaluando el escenario de tráfico de 30000 dispositivos MTC que es el escenario más crítico, se obtiene en base al rango óptimo de *BI* un retardo comprendido de 4593.4 ms a 4756.5 ms, respectivamente. Sin embargo, con la configuración de RAOs de 1 ms se obtiene un retardo comprendido de 3589.9 ms a 4329.6 ms respectivamente, siendo esta última configuración la más favorable.
- En referencia al número promedio de transmisiones de preámbulo y analizando el escenario más crítico mediante el rango óptimo de *BI*, se obtiene para ambas configuraciones de periodicidad de RAOs un promedio de 5 transmisiones de preámbulos cuando se emplea una configuración típica de $k_{max} = 10$. Sin embargo, cuando se opera con una configuración de periodicidad de RAOs de 1 ms en un escenario de tráfico masivo de 25000 dispositivos MTC

se obtiene un promedio de 4 transmisiones de preámbulos siendo este número menor en comparación con la típica configuración de periodicidad de 5 ms.

- Con respecto a la prueba de hipótesis realizada podemos concluir que para tener una transmisión fiable sin incorporar técnicas de control y solo contar con el procedimiento de *backoff* se incrementa el retardo en el acceso y por ende aumentan el número de transmisiones de preámbulos, por ello dichos aumentos son un tanto razonables en aplicaciones tolerantes a retardos.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda considerar la elección del tiempo de *backoff* de forma aleatoria y no asumir un valor fijo ya que esto se lo realiza por conveniencia con el fin de generar el menor retardo posible en el acceso hacia la red al implementar técnicas de control en el RACH omitiendo lo que indica la especificación del 3GPP.
- Para futuros trabajos de investigación que integren el RAP basado en contención se recomienda emplear el rango óptimo de *BI* que integra la configuración de periodicidad de RAOs de 1 ms, para dar cumplimiento a lo que indica la especificación del 3GPP acerca de la elección aleatoria del tiempo de *backoff* y tener una transmisión fiable para los diferentes escenarios con tráfico masivo.
- Se recomienda considerar el uso de tráfico HTC para simular un entorno real debido a que la RAN fue creada con el propósito de manejar este tipo de tráfico, el mismo que no se puede suprimir para realizar pruebas de tráfico MTC.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Tello Oquendo, I. Leyva Mayorga, V. Pla, J. Martinez Bauset, J. R. Vidal, V. Casares Giner and L. Guijarro, "Performance Analysis and Optimal Access Class Barring Parameter Configuration in LTE-A Networks With Massive M2M Traffic," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 4, pp. 3505-3519, April 2018.
- [2] C. Bockelmann, N. Pratas, H. Nikopour, K. Au, T. Svensson, C. Stefanovic, P. Popovski and A. Dekorsy, "Massive machine-type communications in 5G: Physical and MAC-layer solutions," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 9, pp. 59-65, 2016.
- [3] Cisco, "Cisco visual networking index (VNI)," 9 March 2020. [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>.
- [4] 3GPP, TR 37.868, "Study on RAN Improvements for Machine-type Communications," in *Technical Specification Group Radio Access Network*, 2011.
- [5] H. Dakhilallah Althhumali, M. Othman, N. Kamariah Noordin and Z. Mohd Hanapi, "Dynamic Backoff Collision Resolution for Massive M2M Random Access in Cellular IoT Networks," *IEEE Access*, pp. 201345 - 201349, 2020.
- [6] E. Dutkiewicz, X. Costa Perez, I. Z. Kovacs and M. Mueck, "Massive machine-type communications," *IEEE Network*, vol. 31, no. 6, pp. 6-7, 2017.
- [7] Kim, J. S., Lee, S., & Chung, M. Y, «Time-division random-access scheme based on coverage level for cellular internet-of-things in 3GPP networks,» *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 44, pp. 45-57, 2018.
- [8] B. P. S. Sahoo, C. C. Chou, C. W. Weng and H. Y. Wei, "Enabling millimeter-wave 5G networks for massive IoT applications: a closer look at the issues impacting millimeter-waves in consumer devices under the 5G framework.," *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 8, no. 1, pp. 49-54, 2018.
- [9] 3GPP, «Medium Access Control (MAC) Protocol Specification,» de *Evolved Access Universal Terrestrial Radio*, TS 36.321, 2017.
- [10] M. Ouaisa, M. Benmoussa, A. Rhattoy, M. Lahmer and I. Chana, "Performance analysis of random access mechanisms for machine type communications in LTE networks," 2016

International Conference on Advanced Communication Systems and Information Security (ACOSIS), pp. 1-6, 2016.

- [11] H. M. Gursu, M. Vilgelm, W. Kellerer and M. Reisslein, "Hybrid Collision Avoidance-Tree Resolution for," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 53, no. 4, pp. 1974-1987, August 2017.
- [12] J. R. Vidal, L. Tello-Oquendo, V. Pla y L. Guijarro, «Performance Study and Enhancement of Access Barring for Massive Machine-Type Communications,» *IEEE Access*, vol. 7, pp. 63745-63759, 2019.
- [13] M. Wedd, "iotforall," 21 February 2020. [Online]. Available: <https://www.iotforall.com/what-is-cellular-iot>.
- [14] 3GPP , TR 45.820, "Cellular System Support for Ultra-Low Complexity and Low Throughput Internet of Things (CIoT)," no. v13.1.0, 2015.
- [15] Ericsson, "Ericsson Mobility Report," November 2019. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/4acd7e/assets/local/mobility-report/documents/2019/emr-november-2019.pdf>.
- [16] G. Durisi, . T. Koch and P. Popovski, "Toward Massive, Ultrareliable, and Low-Latency Wireless Communication With Short Packets," *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 9, pp. 1711-1726, September 2016.
- [17] F. Wang and G. Ma, "Massive Machine Type Communications," in *Introduction on Massive Machine-Type Communications (mMTC)*, Springer , 2019, pp. 1-3.
- [18] X. Chen, D. Wing Kwan Ng, W. Yu, E. Larsson, N. Al-Dhahir and R. Schober, "Massive Access for 5G and Beyond," February 2020.
- [19] L. Tello-Oquendo, I. Leyva-Mayorga, V. Pla, J. Martinez-Bauset y V. Casares-Giner, «Analysis of LTE-A Random Access Procedure: A Foundation to Propose Mechanisms for Managing the M2M Massive Access in Wireless Cellular Networks,» de *Workshop on Innovation on Information and Communication Technologies (ITACA-WIICT 2015)*, Valencia, 2015.
- [20] L. Tello-Oquendo, V. Pla, I. Leyva-Mayorga, J. Martinez-Bauset, V. Casares-Giner y L. Guijarro, «Efficient random access channel evaluation and load estimation in LTE-A with

- massive MTC,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, n° 2, pp. 1998--2002, 2018.
- [21] 3GPP, TS 36.211, Physical channels and modulation, V16.3.0, 2020.
- [22] C. Salazar Pinto y S. Del Castillo Galarza, «Media Arimética Ponderada,» de *Fundamentos básicos de estadística*, Quito, 2018, pp. 51-52.
- [23] R. A. Sánchez Turcios, «t-Student. Usos y abusos,» *Revista mexicana de cardiología*, vol. 26, n° 1, pp. 59 - 61, 2015.
- [24] D. Pacheco Paramo, L. Tello Oquendo, V. Pla y J. Martinez Bauset , «Deep reinforcement learning mechanism for dynamic access control in wireless networks handling mMTC,» *Ad Hoc Networks*, vol. 94, p. 101939, 2019.
- [25] D. Pacheco-Paramo y L. Tello-Oquendo, «Delay-aware dynamic access control for mMTC in wireless networks using deep reinforcement learning,» *Computer Networks*, vol. 182, p. 107493, 2020.
- [26] S. Bounsiar, F. Z. Benhamida, A. Henni, D. L. D. Ipiña and D. C. Mansilla, "How to Enable Delay Tolerant Network Solutions," *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceeding*, vol. 31, no. 1, pp. 1-11, 2019.

ANEXOS

ANEXO 1

RESULTADOS CORRESPONDIENTES A LA PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO CON UNA PERIODICIDAD DE RAOs DE 5 ms

Tabla 23. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5$ ms para un escenario de tráfico de 10000 dispositivos MTC.

Tráfico de 10000 dispositivos MTC											
<i>BI</i> [ms]	<i>P_s</i>	<i>BI</i> [ms]	<i>P_s</i>	<i>BI</i> [ms]	<i>P_s</i>	<i>BI</i> [ms]	<i>P_s</i>	<i>BI</i> [ms]	<i>P_s</i>	<i>BI</i> [ms]	<i>P_s</i>
20	1	180	1	340	1	500	1	660	1	820	1
30	1	190	1	350	1	510	1	670	1	830	1
40	1	200	1	360	1	520	1	680	1	840	1
50	1	210	1	370	1	530	1	690	1	850	1
60	1	220	1	380	1	540	1	700	1	860	1
70	1	230	1	390	1	550	1	710	1	870	1
80	1	240	1	400	1	560	1	720	1	880	1
90	1	250	1	410	1	570	1	730	1	890	1
100	1	260	1	420	1	580	1	740	1	900	1
110	1	270	1	430	1	590	1	750	1	910	1
120	1	280	1	440	1	600	1	760	1	920	1
130	1	290	1	450	1	610	1	770	1	930	1
140	1	300	1	460	1	620	1	780	1	940	1
150	1	310	1	470	1	630	1	790	1	950	1
160	1	320	1	480	1	640	1	800	1	960	1
170	1	330	1	490	1	650	1	810	1		

Fuente: Autor

Tabla 24. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5$ ms para un escenario de tráfico de 15000 dispositivos MTC.

Tráfico de 15000 dispositivos MTC											
<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s
20	0.9833	180	0.9945	340	0.9977	500	0.9991	660	0.9996	820	0.9999
30	0.9841	190	0.9947	350	0.9978	510	0.9991	670	0.9996	830	0.9999
40	0.9850	200	0.9948	360	0.9980	520	0.9991	680	0.9997	840	0.9999
50	0.9870	210	0.9950	370	0.9981	530	0.9991	690	0.9997	850	0.9999
60	0.9876	220	0.9959	380	0.9982	540	0.9991	700	0.9997	860	0.9999
70	0.9879	230	0.9962	390	0.9983	550	0.9992	710	0.9997	870	0.9999
80	0.9889	240	0.9962	400	0.9984	560	0.9993	720	0.9997	880	0.9999
90	0.9895	250	0.9963	410	0.9984	570	0.9994	730	0.9997	890	0.9999
100	0.9904	260	0.9964	420	0.9985	580	0.9994	740	0.9998	900	0.9999
110	0.9909	270	0.9968	430	0.9986	590	0.9994	750	0.9998	910	0.9999
120	0.9913	280	0.9969	440	0.9987	600	0.9994	760	0.9998	920	0.9999
130	0.9918	290	0.9971	450	0.9987	610	0.9995	770	0.9998	930	0.9999
140	0.9925	300	0.9972	460	0.9989	620	0.9995	780	0.9998	940	0.9999
150	0.9932	310	0.9972	470	0.9989	630	0.9996	790	0.9998	950	0.9999
160	0.9934	320	0.9976	480	0.9990	640	0.9996	800	0.9998	960	0.9999
170	0.9944	330	0.9976	490	0.9991	650	0.9996	810	0.9998		

Fuente: Autor

Tabla 25. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5$ ms para un escenario de tráfico de 20000 dispositivos MTC.

Tráfico de 20000 dispositivos MTC											
<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s
20	0.6963	180	0.7902	340	0.8948	500	0.9465	660	0.9740	820	0.9877
30	0.6969	190	0.8038	350	0.9019	510	0.9500	670	0.9765	830	0.9884
40	0.7001	200	0.8112	360	0.9037	520	0.9508	680	0.9764	840	0.9883
50	0.7054	210	0.8147	370	0.9074	530	0.9530	690	0.9770	850	0.9897
60	0.7151	220	0.8258	380	0.9120	540	0.9550	700	0.9787	860	0.9901
70	0.7194	230	0.8299	390	0.9148	550	0.9574	710	0.9791	870	0.9910
80	0.7199	240	0.8389	400	0.9194	560	0.9583	720	0.9800	880	0.9913
90	0.7269	250	0.8414	410	0.9212	570	0.9597	730	0.9804	890	0.9915
100	0.7358	260	0.8528	420	0.9277	580	0.9632	740	0.9831	900	0.9917
110	0.7407	270	0.8615	430	0.9286	590	0.9641	750	0.9823	910	0.9918
120	0.7485	280	0.8666	440	0.9323	600	0.9654	760	0.9834	920	0.9931
130	0.7571	290	0.8667	450	0.9334	610	0.9668	770	0.9845	930	0.9930
140	0.7644	300	0.8775	460	0.9378	620	0.9688	780	0.9851	940	0.9932
150	0.7709	310	0.8802	470	0.9379	630	0.9701	790	0.9862	950	0.9936
160	0.7851	320	0.8878	480	0.9423	640	0.9710	800	0.9865	960	0.9943
170	0.7891	330	0.8911	490	0.9451	650	0.9725	810	0.9871		

Fuente: Autor

Tabla 26. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5$ ms para un escenario de tráfico de 25000 dispositivos MTC.

Tráfico de 25000 dispositivos MTC											
<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s
20	0.4454	180	0.5130	340	0.6034	500	0.7147	660	0.8232	820	0.8996
30	0.4525	190	0.5194	350	0.6101	510	0.7228	670	0.8306	830	0.9055
40	0.4569	200	0.5204	360	0.6168	520	0.7330	680	0.8368	840	0.9055
50	0.4597	210	0.5265	370	0.6243	530	0.7371	690	0.8411	850	0.9098
60	0.4632	220	0.5344	380	0.6307	540	0.7475	700	0.8466	860	0.9130
70	0.4632	230	0.5429	390	0.6381	550	0.7523	710	0.8546	870	0.9166
80	0.4662	240	0.5450	400	0.6459	560	0.7603	720	0.8603	880	0.9217
90	0.4721	250	0.5488	410	0.6553	570	0.7678	730	0.8647	890	0.9221
100	0.4746	260	0.5541	420	0.6594	580	0.7724	740	0.8693	900	0.9264
110	0.4781	270	0.5578	430	0.6661	590	0.7834	750	0.8721	910	0.9270
120	0.4844	280	0.5685	440	0.6732	600	0.7850	760	0.8773	920	0.9303
130	0.4876	290	0.5750	450	0.6767	610	0.7933	770	0.8801	930	0.9344
140	0.4943	300	0.5796	460	0.6865	620	0.7983	780	0.8836	940	0.9355
150	0.4995	310	0.5842	470	0.6962	630	0.8046	790	0.8890	950	0.9376
160	0.5078	320	0.5937	480	0.7030	640	0.8109	800	0.8936	960	0.9406
170	0.5098	330	0.5981	490	0.7081	650	0.8183	810	0.8983		

Fuente: Autor

Tabla 27. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio con diferentes valores de BI un valor de $T_{RAO} = 5$ ms para un escenario de tráfico de 30000 dispositivos MTC.

Tráfico de 30000 dispositivos MTC											
<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s
20	0.3133	180	0.3641	340	0.4273	500	0.5037	660	0.5916	820	0.6925
30	0.3175	190	0.3662	350	0.4309	510	0.5061	670	0.5999	830	0.6967
40	0.3201	200	0.3718	360	0.4335	520	0.5097	680	0.6010	840	0.7061
50	0.3210	210	0.3749	370	0.4408	530	0.5179	690	0.6088	850	0.7103
60	0.3228	220	0.3800	380	0.4422	540	0.5225	700	0.6128	860	0.7136
70	0.3264	230	0.3836	390	0.4478	550	0.5257	710	0.6230	870	0.7215
80	0.3289	240	0.3852	400	0.4530	560	0.5313	720	0.6256	880	0.7270
90	0.3338	250	0.3894	410	0.4577	570	0.5389	730	0.6337	890	0.7360
100	0.3380	260	0.3924	420	0.4616	580	0.5449	740	0.6367	900	0.7425
110	0.3400	270	0.3979	430	0.4648	590	0.5471	750	0.6437	910	0.7466
120	0.3445	280	0.4021	440	0.4698	600	0.5548	760	0.6520	920	0.7524
130	0.3472	290	0.4062	450	0.4752	610	0.5601	770	0.6593	930	0.7608
140	0.3495	300	0.4089	460	0.4818	620	0.5694	780	0.6677	940	0.7642
150	0.3552	310	0.4131	470	0.4847	630	0.5713	790	0.6717	950	0.7701
160	0.3570	320	0.4177	480	0.4898	640	0.5772	800	0.6756	960	0.7751
170	0.3607	330	0.4205	490	0.4960	650	0.5828	810	0.6850		

Fuente: Autor

ANEXO 2

RESULTADOS CORRESPONDIENTES A LA PROBABILIDAD DE ACCESO SATISFACTORIO CON UNA PERIODICIDAD DE RAOs DE 1 ms

Tabla 28. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1$ ms para un escenario de tráfico de 10000 dispositivos MTC.

Tráfico de 10000 dispositivos MTC											
<i>BI</i> [ms]	<i>P_s</i>	<i>BI</i> [ms]	<i>P_s</i>	<i>BI</i> [ms]	<i>P_s</i>	<i>BI</i> [ms]	<i>P_s</i>	<i>BI</i> [ms]	<i>P_s</i>	<i>BI</i> [ms]	<i>P_s</i>
20	1	180	1	340	1	500	1	660	1	820	1
30	1	190	1	350	1	510	1	670	1	830	1
40	1	200	1	360	1	520	1	680	1	840	1
50	1	210	1	370	1	530	1	690	1	850	1
60	1	220	1	380	1	540	1	700	1	860	1
70	1	230	1	390	1	550	1	710	1	870	1
80	1	240	1	400	1	560	1	720	1	880	1
90	1	250	1	410	1	570	1	730	1	890	1
100	1	260	1	420	1	580	1	740	1	900	1
110	1	270	1	430	1	590	1	750	1	910	1
120	1	280	1	440	1	600	1	760	1	920	1
130	1	290	1	450	1	610	1	770	1	930	1
140	1	300	1	460	1	620	1	780	1	940	1
150	1	310	1	470	1	630	1	790	1	950	1
160	1	320	1	480	1	640	1	800	1	960	1
170	1	330	1	490	1	650	1	810	1		

Fuente: Autor

Tabla 29. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1$ ms para un escenario de tráfico de 15000 dispositivos MTC.

Tráfico de 15000 dispositivos MTC											
<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s
20	0.9865	180	0.9980	340	0.9996	500	0.9995	660	1	820	1
30	0.9910	190	0.9985	350	0.9993	510	0.9999	670	1	830	1
40	0.9921	200	0.9983	360	0.9995	520	0.9997	680	1	840	1
50	0.9945	210	0.9987	370	0.9997	530	0.9997	690	1	850	1
60	0.9939	220	0.9978	380	0.9994	540	0.9997	700	1	860	1
70	0.9947	230	0.9986	390	0.9996	550	0.9995	710	1	870	1
80	0.9939	240	0.9983	400	0.9997	560	0.9999	720	1	880	1
90	0.9957	250	0.9978	410	0.9991	570	0.9999	730	1	890	1
100	0.9960	260	0.9989	420	0.9995	580	1	740	1	900	1
110	0.9961	270	0.9988	430	0.9999	590	1	750	1	910	1
120	0.9967	280	0.9989	440	0.9997	600	1	760	1	920	1
130	0.9977	290	0.9989	450	0.9996	610	1	770	1	930	1
140	0.9973	300	0.9991	460	0.9998	620	1	780	1	940	1
150	0.9979	310	0.9993	470	0.9995	630	1	790	1	950	1
160	0.9982	320	0.9990	480	0.9997	640	1	800	1	960	1
170	0.9980	330	0.9995	490	0.9997	650	1	810	1		

Fuente: Autor

Tabla 30. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1$ ms para un escenario de tráfico de 20000 dispositivos MTC.

Tráfico de 20000 dispositivos MTC											
<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s
20	0.8715	180	0.9023	340	0.9387	500	0.9683	660	0.9857	820	0.9944
30	0.8744	190	0.9041	350	0.9428	510	0.9700	670	0.9866	830	0.9946
40	0.8750	200	0.9064	360	0.9428	520	0.9711	680	0.9869	840	0.9947
50	0.8759	210	0.9096	370	0.9453	530	0.9717	690	0.9877	850	0.9948
60	0.8790	220	0.9124	380	0.9478	540	0.9737	700	0.9892	860	0.9953
70	0.8802	230	0.9155	390	0.9503	550	0.9749	710	0.9890	870	0.9957
80	0.8808	240	0.9167	400	0.9515	560	0.9758	720	0.9895	880	0.9960
90	0.8829	250	0.9198	410	0.9539	570	0.9770	730	0.9903	890	0.9963
100	0.8863	260	0.9212	420	0.9554	580	0.9781	740	0.9910	900	0.9961
110	0.8875	270	0.9244	430	0.9574	590	0.9792	750	0.9910	910	0.9964
120	0.8886	280	0.9254	440	0.9581	600	0.9802	760	0.9918	920	0.9968
130	0.8919	290	0.9290	450	0.9608	610	0.9814	770	0.9923	930	0.9969
140	0.8931	300	0.9306	460	0.9623	620	0.9824	780	0.9928	940	0.9972
150	0.8958	310	0.9324	470	0.9639	630	0.9823	790	0.9932	950	0.9974
160	0.8978	320	0.9355	480	0.9659	640	0.9837	800	0.9935	960	0.9978
170	0.8998	330	0.9361	490	0.9664	650	0.9844	810	0.9940		

Fuente: Autor

Tabla 31. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1$ ms para un escenario de tráfico de 25000 dispositivos MTC.

Tráfico de 25000 dispositivos MTC											
<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s
20	0.7548	180	0.7851	340	0.8251	500	0.8720	660	0.9108	820	0.9434
30	0.7564	190	0.7878	350	0.8279	510	0.8754	670	0.9131	830	0.9462
40	0.7586	200	0.7901	360	0.8297	520	0.8757	680	0.9162	840	0.9479
50	0.7609	210	0.7915	370	0.8332	530	0.8785	690	0.9179	850	0.9489
60	0.7618	220	0.7940	380	0.8364	540	0.8808	700	0.9207	860	0.9511
70	0.7633	230	0.7970	390	0.8392	550	0.8834	710	0.9222	870	0.9532
80	0.7650	240	0.7992	400	0.8417	560	0.8858	720	0.9255	880	0.9536
90	0.7656	250	0.8021	410	0.8459	570	0.8887	730	0.9268	890	0.9569
100	0.7686	260	0.8043	420	0.8483	580	0.8911	740	0.9289	900	0.9581
110	0.7703	270	0.8056	430	0.8494	590	0.8938	750	0.9305	910	0.9587
120	0.7721	280	0.8107	440	0.8541	600	0.8964	760	0.9328	920	0.9604
130	0.7734	290	0.8116	450	0.8551	610	0.8988	770	0.9348	930	0.9613
140	0.7767	300	0.8154	460	0.8591	620	0.9004	780	0.9360	940	0.9628
150	0.7776	310	0.8174	470	0.8621	630	0.9034	790	0.9389	950	0.9645
160	0.7795	320	0.8192	480	0.8641	640	0.9058	800	0.9402	960	0.9653
170	0.7828	330	0.8230	490	0.8677	650	0.9084	810	0.9422		

Fuente: Autor

Tabla 32. Resultados de la probabilidad de acceso satisfactorio con diferentes valores de BI un valor de $T_{RAO} = 1$ ms para un escenario de tráfico de 30000 dispositivos MTC.

Tráfico de 30000 dispositivos MTC											
<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s	<i>BI</i> [ms]	P_s
20	0.6628	180	0.6901	340	0.7274	500	0.7719	660	0.8190	820	0.8626
30	0.6642	190	0.6914	350	0.7298	510	0.7747	670	0.8220	830	0.8643
40	0.6663	200	0.6931	360	0.7334	520	0.7781	680	0.8249	840	0.8670
50	0.6670	210	0.6955	370	0.7354	530	0.7803	690	0.8266	850	0.8697
60	0.6689	220	0.6980	380	0.7383	540	0.7848	700	0.8291	860	0.8731
70	0.6705	230	0.7001	390	0.7417	550	0.7868	710	0.8321	870	0.8746
80	0.6711	240	0.7036	400	0.7433	560	0.7886	720	0.8351	880	0.8777
90	0.6719	250	0.7049	410	0.7470	570	0.7919	730	0.8384	890	0.8795
100	0.6736	260	0.7080	420	0.7486	580	0.7966	740	0.8410	900	0.8825
110	0.6766	270	0.7109	430	0.7518	590	0.7983	750	0.8443	910	0.8848
120	0.6772	280	0.7121	440	0.7547	600	0.8009	760	0.8462	920	0.8873
130	0.6796	290	0.7146	450	0.7593	610	0.8042	770	0.8497	930	0.8906
140	0.6812	300	0.7177	460	0.7604	620	0.8066	780	0.8518	940	0.8925
150	0.6836	310	0.7195	470	0.7633	630	0.8100	790	0.8550	950	0.8930
160	0.6863	320	0.7226	480	0.7659	640	0.8127	800	0.8565	960	0.8973
170	0.6866	330	0.7250	490	0.7701	650	0.8153	810	0.8590		

Fuente: Autor

ANEXO 3

RESULTADOS CORRESPONDIENTES AL RETARDO EN EL ACCESO BASADO EN EL PERCENTIL 95 Y EMPLEANDO UNA PERIODICIDAD DE RAOS DE 5 ms

Tabla 33. Resultados correspondientes al retardo en el acceso basado en el percentil 95 con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5$ ms para un escenario de tráfico de 10000 dispositivos MTC.

Tráfico de 20000 dispositivos MTC											
<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
20	71.5	180	301.1	340	535.2	500	761.3	660	979.9	820	1199.4
30	85.5	190	315.3	350	550.6	510	776.6	670	999	830	1224.5
40	100.4	200	334.1	360	564.8	520	784.2	680	1009.4	840	1239.1
50	115.2	210	346.2	370	575.4	530	799.5	690	1029.1	850	1244.7
60	129.8	220	359.3	380	590.6	540	805.5	700	1043.9	860	1241.8
70	144	230	374	390	604.9	550	829.6	710	1055.3	870	1276.8
80	157.9	240	390.2	400	625	560	836.3	720	1064.3	880	1286
90	174.3	250	404.9	410	636.5	570	863.6	730	1076.1	890	1295
100	186.1	260	414.4	420	652.1	580	872.8	740	1092.5	900	1329.8
110	202.5	270	430.7	430	655.8	590	886.1	750	1109.2	910	1324.7
120	215.8	280	446.6	440	671.3	600	897.5	760	1115.7	920	1351.5
130	230.2	290	464.7	450	685.7	610	920.3	770	1137	930	1358.9
140	244.2	300	477.4	460	704.6	620	930.9	780	1154.4	940	1381.3
150	260.7	310	496.4	470	710.1	630	940.8	790	1169.2	950	1384.3
160	274.6	320	505.5	480	734.5	640	957.1	800	1180.3	960	1390.2
170	289.2	330	515.5	490	755.7	650	966.4	810	1189.3		

Fuente: Autor

Tabla 34. Resultados correspondientes al retardo en el acceso basado en el percentil 95 con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5$ ms para un escenario de tráfico de 15000 dispositivos MTC.

Tráfico de 15000 dispositivos MTC											
<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
20	132.6	180	533.8	340	880.9	500	1173.2	660	1445.1	820	1713.8
30	158.6	190	555.5	350	894.3	510	1189.1	670	1471.8	830	1739.3
40	189.4	200	579.1	360	911.1	520	1208.1	680	1494.8	840	1725.5
50	215.3	210	603.3	370	929.6	530	1211.3	690	1493.5	850	1751.7
60	239.2	220	614.9	380	945.3	540	1255	700	1512.3	860	1785
70	267.7	230	638.3	390	970.8	550	1263.5	710	1539.8	870	1772.4
80	295.7	240	660	400	986.6	560	1284.3	720	1549.6	880	1777.1
90	316.5	250	684.4	410	1005.3	570	1300	730	1552.4	890	1792.5
100	344.9	260	709.1	420	1029.1	580	1325.3	740	1565.2	900	1835
110	368.1	270	729.2	430	1045.8	590	1340.8	750	1606.9	910	1834.9
120	394.9	280	750.1	440	1057.7	600	1324.9	760	1599.9	920	1859.5
130	417.7	290	763.6	450	1072.1	610	1370.8	770	1617	930	1873.9
140	441.8	300	796.6	460	1100.1	620	1376.1	780	1644	940	1868.4
150	463.5	310	817.9	470	1119.9	630	1402.9	790	1662.2	950	1899.9
160	484.7	320	834.1	480	1136.7	640	1403.5	800	1669	960	1900.8
170	509.4	330	855.8	490	1150.8	650	1440	810	1690.6		

Fuente: Autor

Tabla 35. Resultados correspondientes al retardo en el acceso basado en el percentil 95 con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5$ ms para un escenario de tráfico de 20000 dispositivos MTC.

Tráfico de 20000 dispositivos MTC											
<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
20	180,3	180	846,8	340	1481,7	500	2041,2	660	2500	820	2877,3
30	220,8	190	891,6	350	1506,2	510	2059,5	670	2518	830	2897
40	261,3	200	929,4	360	1553,8	520	2110,1	680	2549,1	840	2930,3
50	302,1	210	972,3	370	1591,4	530	2131,6	690	2583,3	850	2939,9
60	343,7	220	1012,5	380	1629,7	540	2161,1	700	2598,8	860	2941,3
70	384,8	230	1052,1	390	1671	550	2184,5	710	2626	870	2964,8
80	427,9	240	1094,1	400	1700,9	560	2230,1	720	2655	880	2984,5
90	470,6	250	1141	410	1734,4	570	2254,4	730	2686,7	890	3008,9
100	510,8	260	1170,9	420	1762,9	580	2276,3	740	2695,3	900	3024
110	551,6	270	1210,8	430	1804,2	590	2320,2	750	2734,5	910	3046,5
120	596	280	1250	440	1842,9	600	2336,3	760	2744,2	920	3050,5
130	636,5	290	1295,9	450	1881,8	610	2367,2	770	2770,2	930	3074,2
140	681,3	300	1329,8	460	1906,4	620	2393,4	780	2782	940	3096,7
150	718,6	310	1367,5	470	1951,9	630	2439,9	790	2823,6	950	3128,4
160	765,5	320	1403,4	480	1970,2	640	2457,3	800	2833,6	960	3135,4
170	802,4	330	1439,9	490	2004,4	650	2475	810	2850,6		

Fuente: Autor

Tabla 36. Resultados correspondientes al retardo en el acceso basado en el percentil 95 con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5 \text{ ms}$ para un escenario de tráfico de 25000 dispositivos MTC.

Tráfico de 25000 dispositivos MTC											
<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
20	183,8	180	884,8	340	1647,9	500	2410,2	660	3116,2	820	3712,8
30	224,7	190	931,7	350	1691,1	510	2459,3	670	3142,6	830	3740,2
40	266	200	981,7	360	1751,8	520	2509,6	680	3193	840	3789,3
50	309,7	210	1026	370	1792,7	530	2550,5	690	3227,4	850	3816,1
60	350,9	220	1075,1	380	1839,5	540	2591,2	700	3276,4	860	3855,7
70	394,1	230	1122,3	390	1890,4	550	2641,3	710	3305,9	870	3889,9
80	437,1	240	1165,1	400	1940,4	560	2680,8	720	3335,3	880	3904,8
90	480,5	250	1217,7	410	1989,4	570	2727,1	730	3379	890	3952,6
100	527,8	260	1271,7	420	2039,4	580	2770,5	740	3407,4	900	3971,7
110	569,1	270	1317,6	430	2085,2	590	2817,9	750	3452,3	910	4029,1
120	614,8	280	1362,1	440	2134,1	600	2870,4	760	3488,9	920	4040,7
130	659,2	290	1405,6	450	2183,3	610	2906,7	770	3547,2	930	4067,2
140	704,2	300	1457,1	460	2230,6	620	2946,9	780	3571,5	940	4101
150	749,2	310	1507,3	470	2276,4	630	2993,5	790	3606,1	950	4143,7
160	791,5	320	1557,6	480	2318,7	640	3031,9	800	3644,3	960	4169,3
170	839,9	330	1600,8	490	2360,4	650	3062,9	810	3663		

Fuente: Autor

Tabla 37. Resultados correspondientes al retardo en el acceso basado en el percentil 95 con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5 \text{ ms}$ para un escenario de tráfico de 30000 dispositivos MTC.

Tráfico de 30000 dispositivos MTC											
<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
20	184,1	180	900,6	340	1698	500	2534,9	660	3370,6	820	4140,6
30	224,8	190	947,4	350	1758,1	510	2590,4	670	3419	830	4189,8
40	267,2	200	999,4	360	1809	520	2641,1	680	3474,3	840	4243,1
50	309	210	1042,4	370	1857,3	530	2693,1	690	3525,2	850	4285,2
60	351,9	220	1092,7	380	1907,1	540	2752,9	700	3575,6	860	4332,6
70	395,5	230	1147,6	390	1968,7	550	2807,4	710	3624,1	870	4379,6
80	439,3	240	1194,3	400	2009,7	560	2856,9	720	3680,4	880	4427,6
90	485,1	250	1244,7	410	2067,2	570	2916,5	730	3716,9	890	4459
100	529,9	260	1295,9	420	2118,1	580	2963,8	740	3761,5	900	4510,6
110	575,9	270	1347	430	2170,1	590	3008	750	3811,7	910	4558,2
120	619,2	280	1390,4	440	2226	600	3061,8	760	3863,1	920	4593,4
130	664,2	290	1445,6	450	2272,6	610	3115,9	770	3907,3	930	4632,4
140	713	300	1489,5	460	2330,4	620	3162,9	780	3958,9	940	4679,3
150	755,9	310	1549,3	470	2379,8	630	3223,7	790	4014	950	4728,5
160	805,4	320	1599,1	480	2434,4	640	3269,1	800	4059,8	960	4756,5
170	853,9	330	1651,1	490	2494,4	650	3311,6	810	4104,5		

Fuente: Autor

ANEXO 4

RESULTADOS CORRESPONDIENTES AL RETARDO EN EL ACCESO BASADO EN EL PERCENTIL 95 Y EMPLEANDO UNA PERIODICIDAD DE RAOS DE 1 ms

Tabla 38. Resultados correspondientes al retardo en el acceso basado en el percentil 95 con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1$ ms para un escenario de tráfico de 10000 dispositivos MTC.

Tráfico de 10000 dispositivos MTC											
<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
20	60,7	180	231,5	340	420,2	500	595,1	660	776	820	956,6
30	61	190	245,5	350	428,4	510	603,7	670	781,5	830	955,1
40	71,5	200	253,2	360	435,1	520	625,5	680	794,6	840	965,6
50	83,7	210	262,4	370	446,7	530	620,8	690	798,8	850	982,1
60	95,1	220	276,6	380	460,7	540	644,7	700	823,5	860	981,3
70	106,8	230	289,1	390	474,2	550	663,1	710	832,1	870	1014,8
80	118,1	240	300,3	400	487,3	560	655,1	720	829,5	880	1015
90	130,2	250	314,1	410	492,6	570	668,5	730	858,5	890	1031
100	141,5	260	324,2	420	504,8	580	681,5	740	870	900	1049
110	152,3	270	333,6	430	515,6	590	693,1	750	872,3	910	1045,6
120	164,5	280	346,3	440	526,4	600	703	760	868,8	920	1074,6
130	175,1	290	359	450	538,5	610	716,4	770	897,3	930	1060,9
140	186,9	300	371,4	460	552,7	620	727,4	780	910,2	940	1073,1
150	198,9	310	381,9	470	567,2	630	739,7	790	908,8	950	1091,2
160	211,7	320	393,1	480	569,8	640	761,3	800	922,8	960	1105,5
170	222,4	330	405	490	587,5	650	767,8	810	934,1		

Fuente: Autor

Tabla 39. Resultados correspondientes al retardo en el acceso basado en el percentil 95 con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1$ ms para un escenario de tráfico de 15000 dispositivos MTC.

Tráfico de 15000 dispositivos MTC											
<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
20	90,1	180	423,8	340	722,5	500	1004,2	660	1229,3	820	1438,3
30	113,9	190	449,2	350	757,5	510	1004,5	670	1250,6	830	1451,5
40	139,7	200	467,7	360	764,7	520	1008	680	1251	840	1479,5
50	158,2	210	487,8	370	785,2	530	1023,8	690	1269,7	850	1520
60	183,4	220	518,6	380	790,4	540	1039,2	700	1273,4	860	1542,5
70	202,7	230	524	390	807,8	550	1046,8	710	1293	870	1520,5
80	230,1	240	547	400	815,2	560	1066	720	1322	880	1529,2
90	247,6	250	582,4	410	828,9	570	1084,6	730	1323	890	1539,5
100	267,1	260	589,9	420	841,4	580	1112	740	1325,3	900	1555
110	284,2	270	603,5	430	854,3	590	1121,6	750	1346,3	910	1563,2
120	310	280	613,9	440	879,3	600	1134,7	760	1375	920	1629,6
130	331,8	290	651,9	450	902	610	1157,5	770	1377,7	930	1617
140	352,6	300	654,9	460	914,1	620	1173	780	1411,5	940	1619
150	367,6	310	660,4	470	934,8	630	1196,6	790	1418	950	1631,3
160	387,8	320	695,3	480	952	640	1197,5	800	1424,5	960	1632,6
170	413,4	330	700,6	490	979,7	650	1228	810	1427,5		

Fuente: Autor

Tabla 40. Resultados correspondientes al retardo en el acceso basado en el percentil 95 con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1$ ms para un escenario de tráfico de 20000 dispositivos MTC.

Tráfico de 20000 dispositivos MTC											
<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
20	129	180	755,8	340	1346,7	500	1846,4	660	2250	820	2561,9
30	168,4	190	792,7	350	1379,6	510	1884,1	670	2270,6	830	2563,7
40	208,2	200	830,8	360	1417,6	520	1903,8	680	2306,1	840	2589,7
50	248,6	210	865,2	370	1453,4	530	1947,4	690	2331	850	2610
60	285,3	220	902,9	380	1477,3	540	1958,8	700	2359,3	860	2631,8
70	326,4	230	941,6	390	1515,9	550	1990,1	710	2377,4	870	2637
80	365,2	240	982,5	400	1547,7	560	2013,7	720	2394,6	880	2652,7
90	404,7	250	1019,4	410	1579,9	570	2044,6	730	2405,4	890	2660
100	443,5	260	1057,9	420	1609,7	580	2074,6	740	2421,5	900	2685,2
110	481,9	270	1093,4	430	1639,6	590	2094,4	750	2445,9	910	2694,3
120	520,7	280	1128,4	440	1676,1	600	2119,6	760	2469,9	920	2729,4
130	560,3	290	1165	450	1707,6	610	2148,5	770	2466,2	930	2728,4
140	598	300	1205,1	460	1738,9	620	2176,2	780	2497,6	940	2737,1
150	640,4	310	1236,6	470	1770,9	630	2230,8	790	2496,6	950	2758,2
160	677,5	320	1273,1	480	1789,8	640	2232,6	800	2516,4	960	2763,8
170	716,2	330	1308,8	490	1821,1	650	2233,7	810	2541,5		

Fuente: Autor

Tabla 41. Resultados correspondientes al retardo en el acceso basado en el percentil 95 con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1$ ms para un escenario de tráfico de 25000 dispositivos MTC.

Tráfico de 25000 dispositivos MTC											
<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
20	137	180	823,8	340	1511,5	500	2233,2	660	2847,1	820	3426,8
30	179,7	190	867,9	350	1557,1	510	2272,2	670	2885,9	830	3458,9
40	222,5	200	907,9	360	1595,9	520	2272,4	680	2926,9	840	3497,9
50	265,4	210	952	370	1640,1	530	2315	690	2948,4	850	3521,4
60	308	220	995,6	380	1683,7	540	2357,4	700	2996,5	860	3557,2
70	351,5	230	1035,9	390	1725,3	550	2403,9	710	3030,2	870	3606,4
80	393,1	240	1084,4	400	1771,2	560	2448,1	720	3079,4	880	3629
90	436,9	250	1123,7	410	1814,1	570	2489,1	730	3113,4	890	3686,1
100	479,4	260	1168,2	420	1851,3	580	2524,2	740	3142,4	900	3701,3
110	521,4	270	1209,6	430	1898,1	590	2561,7	750	3176,3	910	3709,2
120	564,5	280	1251,5	440	1945,6	600	2608,9	760	3212,3	920	3747,8
130	606	290	1296	450	1986,7	610	2651,3	770	3252,6	930	3773,9
140	648,6	300	1339,9	460	2029,1	620	2695,8	780	3278,5	940	3808
150	692,8	310	1377,7	470	2067,6	630	2725,2	790	3324	950	3821,6
160	732,9	320	1425,6	480	2117,1	640	2765,4	800	3368,4	960	3861,5
170	780,3	330	1467,6	490	2155,7	650	2808,6	810	3392,1		

Fuente: Autor

Tabla 42. Resultados correspondientes al retardo en el acceso basado en el percentil 95 con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1$ ms para un escenario de tráfico de 30000 dispositivos MTC.

Tráfico de 30000 dispositivos MTC											
<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>	<i>BI</i>	<i>D</i>
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
20	140,9	180	851,1	340	1577,3	500	2313	660	3046,4	820	3767,6
30	185	190	898,1	350	1625,8	510	2366,5	670	3090,4	830	3814,1
40	229,4	200	941,2	360	1675,7	520	2401,1	680	3141,7	840	3848,4
50	273	210	988	370	1718,3	530	2457,5	690	3184	850	3899,1
60	316,7	220	1029,2	380	1759,1	540	2496,2	700	3229,1	860	3931,6
70	361,9	230	1074	390	1809,3	550	2545,2	710	3279,6	870	3972,2
80	406,2	240	1122,7	400	1857,4	560	2599,4	720	3318,3	880	4021
90	450,1	250	1168,9	410	1899,8	570	[38,7	730	3367,1	890	4059
100	495,3	260	1209,8	420	1945,7	580	2685	740	3414,8	900	4099,7
110	539,4	270	1256,9	430	1992,8	590	2731,2	750	3460,1	910	4146
120	583,1	280	1305,6	440	2039,9	600	2776,8	760	3500,8	920	4187,6
130	630,7	290	1349,4	450	2085,5	610	2824	770	3554,6	930	4229,3
140	673,6	300	1395,6	460	2131	620	2868,6	780	3589,9	940	4273,8
150	718,2	310	1441,5	470	2177,5	630	2915,7	790	3631,6	950	4310,8
160	761,9	320	1485,5	480	2228	640	2954	800	3670,9	960	4329,6
170	805,5	330	1526,8	490	2266,6	650	3006,8	810	3715,8		

Fuente: Autor

ANEXO 5

RESULTADOS DEL NÚMERO PROMEDIO DE TRANSMISIONES DE PREÁMBULO UTILIZANDO UNA PERIODICIDAD DE RAOs DE 5 ms

Tabla 43. Resultados correspondientes al número promedio de transmisiones de preámbulos con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5$ ms para un escenario de tráfico de 10000 dispositivos MTC.

Tráfico de 10000 dispositivos MTC											
<i>BI</i> [ms]	<i>k</i>	<i>BI</i> [ms]	<i>k</i>	<i>BI</i> [ms]	<i>k</i>	<i>BI</i> [ms]	<i>k</i>	<i>BI</i> [ms]	<i>k</i>	<i>BI</i> [ms]	<i>k</i>
20	1,7570	180	1,7502	340	1,7514	500	1,7511	660	1,7382	820	1,7303
30	1,7525	190	1,7466	350	1,7559	510	1,7474	670	1,7449	830	1,7392
40	1,7589	200	1,7521	360	1,7499	520	1,7478	680	1,7373	840	1,7429
50	1,7591	210	1,7602	370	1,7531	530	1,7436	690	1,7429	850	1,7329
60	1,7601	220	1,7490	380	1,7539	540	1,7391	700	1,7408	860	1,7306
70	1,7461	230	1,7513	390	1,7506	550	1,7405	710	1,7471	870	1,7354
80	1,7545	240	1,7581	400	1,7531	560	1,7413	720	1,7338	880	1,7338
90	1,7617	250	1,7517	410	1,7517	570	1,7528	730	1,7400	890	1,7341
100	1,7556	260	1,7463	420	1,7522	580	1,7463	740	1,7387	900	1,7407
110	1,7592	270	1,7540	430	1,7420	590	1,7452	750	1,7454	910	1,7342
120	1,7513	280	1,7551	440	1,7448	600	1,7353	760	1,7347	920	1,7416
130	1,7532	290	1,7515	450	1,7488	610	1,7453	770	1,7441	930	1,7295
140	1,7531	300	1,7551	460	1,7467	620	1,7465	780	1,7435	940	1,7325
150	1,7582	310	1,7536	470	1,7431	630	1,7431	790	1,7377	950	1,7413
160	1,7515	320	1,7509	480	1,7478	640	1,7416	800	1,7382	960	1,7310
170	1,7496	330	1,7494	490	1,7594	650	1,7365	810	1,7343		

Fuente: Autor

Tabla 44. Resultados correspondientes al número promedio de transmisiones de preámbulos con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5$ ms para un escenario de tráfico de 15000 dispositivos MTC.

Tráfico de 15000 dispositivos MTC											
BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k
20	2.5575	180	2.4299	340	2.3302	500	2.2483	660	2.1890	820	2.1421
30	2.5355	190	2.4219	350	2.3273	510	2.2410	670	2.1805	830	2.1423
40	2.5573	200	2.4194	360	2.3127	520	2.2430	680	2.1818	840	2.1337
50	2.5360	210	2.4188	370	2.3111	530	2.2200	690	2.1823	850	2.1309
60	2.5250	220	2.3913	380	2.2998	540	2.2401	700	2.1705	860	2.1409
70	2.5221	230	2.3874	390	2.2982	550	2.2338	710	2.1794	870	2.1187
80	2.5280	240	2.3827	400	2.2909	560	2.2216	720	2.1680	880	2.1153
90	2.4853	250	2.3828	410	2.2870	570	2.2190	730	2.1584	890	2.1073
100	2.4975	260	2.3740	420	2.2884	580	2.2245	740	2.1508	900	2.1167
110	2.4906	270	2.3735	430	2.2868	590	2.2150	750	2.1663	910	2.1128
120	2.4843	280	2.3660	440	2.2739	600	2.1893	760	2.1520	920	2.1104
130	2.4712	290	2.3515	450	2.2657	610	2.2074	770	2.1466	930	2.1101
140	2.4741	300	2.3622	460	2.2586	620	2.1970	780	2.1465	940	2.0938
150	2.4569	310	2.3463	470	2.2687	630	2.1940	790	2.1456	950	2.1065
160	2.4437	320	2.3408	480	2.2651	640	2.1869	800	2.1412	960	2.0943
170	2.4367	330	2.3400	490	2.2428	650	2.1924	810	2.1425		

Fuente: Autor

Tabla 45. Resultados correspondientes al número promedio de transmisiones de preámbulos con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5$ ms para un escenario de tráfico de 20000 dispositivos MTC.

Tráfico de 20000 dispositivos MTC											
BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k
20	3.4430	180	3.5911	340	3.5641	500	3.4049	660	3.2287	820	3.0556
30	3.4394	190	3.6072	350	3.5405	510	3.3851	670	3.2017	830	3.0552
40	3.4572	200	3.5968	360	3.5386	520	3.3919	680	3.2018	840	3.0584
50	3.4644	210	3.6173	370	3.5366	530	3.3736	690	3.2013	850	3.0383
60	3.4689	220	3.6131	380	3.5141	540	3.3598	700	3.1771	860	3.0109
70	3.4843	230	3.6133	390	3.5224	550	3.3428	710	3.1813	870	3.0005
80	3.5127	240	3.6195	400	3.4974	560	3.3470	720	3.1644	880	3.0009
90	3.5287	250	3.6237	410	3.4904	570	3.3276	730	3.1600	890	3.0009
100	3.5316	260	3.6001	420	3.4748	580	3.3034	740	3.1261	900	3.0097
110	3.5408	270	3.5932	430	3.4648	590	3.3019	750	3.1445	910	3.0177
120	3.5689	280	3.5922	440	3.4696	600	3.2946	760	3.1267	920	3.0139
130	3.5688	290	3.6035	450	3.4685	610	3.2842	770	3.1107	930	3.0138
140	3.5957	300	3.5910	460	3.4379	620	3.2685	780	3.1012	940	3.0047
150	3.5852	310	3.5807	470	3.4541	630	3.2662	790	3.0943	950	3.0127
160	3.5992	320	3.5636	480	3.4140	640	3.2473	800	3.0787	960	3.0087
170	3.5902	330	3.5542	490	3.4176	650	3.2388	810	3.0623		

Fuente: Autor

Tabla 46. Resultados correspondientes al número promedio de transmisiones de preámbulos con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5$ ms para un escenario de tráfico de 25000 dispositivos MTC.

Tráfico de 25000 dispositivos MTC											
BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k
20	3.5084	180	3.7789	340	4.0308	500	4.1374	660	4.1408	820	4.0112
30	3.5276	190	3.8097	350	4.0261	510	4.1509	670	4.1192	830	4.0191
40	3.5592	200	3.8174	360	4.0379	520	4.1505	680	4.1240	840	4.0217
50	3.5389	210	3.8292	370	4.0501	530	4.1526	690	4.1101	850	4.0097
60	3.5702	220	3.8518	380	4.0533	540	4.1509	700	4.1133	860	4.0097
70	3.5824	230	3.8738	390	4.0633	550	4.1621	710	4.0819	870	4.0054
80	3.5990	240	3.8616	400	4.0807	560	4.1565	720	4.0813	880	4.0039
90	3.6341	250	3.8966	410	4.0924	570	4.1477	730	4.0669	890	4.0482
100	3.6578	260	3.9317	420	4.1035	580	4.1596	740	4.0576	900	4.0216
110	3.6480	270	3.9489	430	4.1052	590	4.1548	750	4.0590	910	4.0054
120	3.6721	280	3.9371	440	4.1035	600	4.1546	760	4.0508	920	4.0083
130	3.7003	290	3.9494	450	4.1364	610	4.1454	770	4.0575	930	4.0147
140	3.7171	300	3.9721	460	4.1354	620	4.1544	780	4.0337	940	4.0019
150	3.7364	310	3.9689	470	4.1204	630	4.1472	790	4.0274	950	4.0077
160	3.7460	320	3.9906	480	4.1375	640	4.1506	800	4.0142	960	4.0026
170	3.7764	330	4.0050	490	4.1359	650	4.1331	810	4.0350		

Fuente: Autor

Tabla 47. Resultados correspondientes al número promedio de transmisiones de preámbulos con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 5$ ms para un escenario de tráfico de 30000 dispositivos MTC.

Tráfico de 30000 dispositivos MTC											
BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k
20	3.4693	180	3.8275	340	4.1102	500	4.3258	660	4.4823	820	4.5621
30	3.4799	190	3.8395	350	4.1264	510	4.3365	670	4.4945	830	4.5678
40	3.5108	200	3.8775	360	4.1377	520	4.3443	680	4.5167	840	4.5623
50	3.5415	210	3.8776	370	4.1599	530	4.3583	690	4.5067	850	4.5621
60	3.5487	220	3.8870	380	4.1680	540	4.3743	700	4.5139	860	4.5821
70	3.5796	230	3.9018	390	4.1867	550	4.3969	710	4.5151	870	4.5770
80	3.6008	240	3.9357	400	4.1906	560	4.4178	720	4.5280	880	4.5758
90	3.6206	250	3.9619	410	4.2104	570	4.4177	730	4.5310	890	4.5615
100	3.6434	260	3.9795	420	4.2236	580	4.4182	740	4.5401	900	4.5596
110	3.6705	270	3.9885	430	4.2381	590	4.4346	750	4.5512	910	4.5714
120	3.7069	280	4.0023	440	4.2621	600	4.4333	760	4.5561	920	4.5628
130	3.7109	290	4.0255	450	4.2631	610	4.4531	770	4.5442	930	4.5608
140	3.7358	300	4.0468	460	4.2737	620	4.4564	780	4.5421	940	4.5576
150	3.7545	310	4.0551	470	4.2921	630	4.4687	790	4.5622	950	4.5566
160	3.7719	320	4.0724	480	4.3094	640	4.4769	800	4.5602	960	4.5628
170	3.8034	330	4.0956	490	4.3212	650	4.4702	810	4.5666		

Fuente: Autor

ANEXO 6

RESULTADOS DEL NÚMERO PROMEDIO DE TRANSMISIONES DE PREÁMBULO UTILIZANDO UNA PERIODICIDAD DE RAOs DE 1 ms

Tabla 48. Resultados correspondientes al número promedio de transmisiones de preámbulos con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1$ ms para un escenario de tráfico de 10000 dispositivos MTC.

Tráfico de 10000 dispositivos MTC											
<i>BI</i> [ms]	<i>k</i>	<i>BI</i> [ms]	<i>k</i>	<i>BI</i> [ms]	<i>k</i>	<i>BI</i> [ms]	<i>k</i>	<i>BI</i> [ms]	<i>k</i>	<i>BI</i> [ms]	<i>k</i>
20	1.5933	180	1.5908	340	1.5945	500	1.5833	660	1.5892	820	1.5817
30	1.5901	190	1.5948	350	1.5878	510	1.5792	670	1.5805	830	1.5717
40	1.5875	200	1.5865	360	1.5886	520	1.5899	680	1.5789	840	1.5785
50	1.5916	210	1.5846	370	1.5888	530	1.5810	690	1.5821	850	1.5774
60	1.5920	220	1.5855	380	1.5834	540	1.5887	700	1.5854	860	1.5749
70	1.5919	230	1.5892	390	1.5857	550	1.5887	710	1.5844	870	1.5825
80	1.5933	240	1.5855	400	1.5882	560	1.5842	720	1.5788	880	1.5766
90	1.5895	250	1.5907	410	1.5824	570	1.5797	730	1.5829	890	1.5818
100	1.5916	260	1.5860	420	1.5832	580	1.5770	740	1.5807	900	1.5811
110	1.5897	270	1.5870	430	1.5839	590	1.5830	750	1.5782	910	1.5755
120	1.5915	280	1.5869	440	1.5861	600	1.5812	760	1.5755	920	1.5849
130	1.5876	290	1.5846	450	1.5821	610	1.5817	770	1.5805	930	1.5718
140	1.5873	300	1.5907	460	1.5845	620	1.5779	780	1.5784	940	1.5766
150	1.5904	310	1.5891	470	1.5861	630	1.5824	790	1.5747	950	1.5762
160	1.5913	320	1.5860	480	1.5813	640	1.5853	800	1.5766	960	1.5815
170	1.5856	330	1.5878	490	1.5890	650	1.5850	810	1.5781		

Fuente: Autor

Tabla 49. Resultados correspondientes al número promedio de transmisiones de preámbulos con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1$ ms para un escenario de tráfico de 15000 dispositivos MTC.

Tráfico de 15000 dispositivos MTC											
BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k
20	2.3380	180	2.1730	340	2.1037	500	2.0514	660	1.9799	820	1.9181
30	2.3400	190	2.1776	350	2.0986	510	2.0425	670	1.9821	830	1.9289
40	2.3380	200	2.1643	360	2.0741	520	2.0251	680	1.9689	840	1.9321
50	2.2870	210	2.1600	370	2.0829	530	2.0309	690	1.9572	850	1.9243
60	2.2705	220	2.1646	380	2.0909	540	2.0217	700	1.9569	860	1.9565
70	2.2777	230	2.1675	390	2.0859	550	2.0055	710	1.9605	870	1.9175
80	2.2727	240	2.1634	400	2.0544	560	2.0025	720	1.9645	880	1.8985
90	2.2362	250	2.1696	410	2.0591	570	2.0048	730	1.9643	890	1.9258
100	2.2209	260	2.1572	420	2.0586	580	2.0201	740	1.9513	900	1.9079
110	2.2117	270	2.1434	430	2.0471	590	2.0009	750	1.9480	910	1.8977
120	2.2043	280	2.1342	440	2.0439	600	2.0004	760	1.9623	920	1.9335
130	2.2001	290	2.1389	450	2.0520	610	2.0025	770	1.9460	930	1.9229
140	2.1871	300	2.1168	460	2.0388	620	1.9911	780	1.9571	940	1.9139
150	2.1760	310	2.1102	470	2.0345	630	1.9963	790	1.9578	950	1.8962
160	2.1787	320	2.1181	480	2.0526	640	1.9812	800	1.9465	960	1.9054
170	2.1727	330	2.1002	490	2.0581	650	1.9903	810	1.9364		

Fuente: Autor

Tabla 50. Resultados correspondientes al número promedio de transmisiones de preámbulos con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1$ ms para un escenario de tráfico de 20000 dispositivos MTC.

Tráfico de 20000 dispositivos MTC											
BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k
20	3,3684	180	3,3710	340	3,2896	500	3,1212	660	2,9398	820	2,7730
30	3,3668	190	3,3577	350	3,2546	510	3,1189	670	2,9398	830	2,7572
40	3,3769	200	3,3585	360	3,2578	520	3,0977	680	2,9416	840	2,7557
50	3,3861	210	3,3561	370	3,2640	530	3,1162	690	2,9263	850	2,7584
60	3,3621	220	3,3396	380	3,2392	540	3,0737	700	2,8930	860	2,7430
70	3,3638	230	3,3416	390	3,2324	550	3,0713	710	2,8973	870	2,7209
80	3,3688	240	3,3458	400	3,2282	560	3,0667	720	2,8953	880	2,7065
90	3,3763	250	3,3244	410	3,2078	570	3,0477	730	2,8754	890	2,7106
100	3,3715	260	3,3289	420	3,2129	580	3,0414	740	2,8602	900	2,7093
110	3,3600	270	3,3237	430	3,1940	590	3,0288	750	2,8621	910	2,6901
120	3,3558	280	3,3142	440	3,1946	600	3,0200	760	2,8482	920	2,6866
130	3,3553	290	3,3044	450	3,1771	610	3,0144	770	2,8233	930	2,6718
140	3,3660	300	3,3017	460	3,1658	620	3,0081	780	2,8192	940	2,6653
150	3,3649	310	3,2944	470	3,1620	630	3,0036	790	2,8080	950	2,6515
160	3,3740	320	3,2936	480	3,1354	640	3,0007	800	2,7961	960	2,6478
170	3,3602	330	3,2872	490	3,1327	650	2,9571	810	2,7880		

Fuente: Autor

Tabla 51. Resultados correspondientes al número promedio de transmisiones de preámbulos con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1$ ms para un escenario de tráfico de 25000 dispositivos MTC.

Tráfico de 25000 dispositivos MTC											
BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k
20	3,8430	180	3,8675	340	3,8691	500	3,8207	660	3,7579	820	3,6435
30	3,8473	190	3,8719	350	3,8697	510	3,8179	670	3,7592	830	3,6441
40	3,8556	200	3,8618	360	3,8640	520	3,8227	680	3,7549	840	3,6414
50	3,8432	210	3,8653	370	3,8592	530	3,8129	690	3,7357	850	3,6329
60	3,8460	220	3,8706	380	3,8619	540	3,8135	700	3,7378	860	3,6169
70	3,8509	230	3,8604	390	3,8681	550	3,8129	710	3,7419	870	3,6178
80	3,8507	240	3,8694	400	3,8580	560	3,8067	720	3,7281	880	3,6085
90	3,8531	250	3,8675	410	3,8670	570	3,8024	730	3,7215	890	3,5879
100	3,8560	260	3,8696	420	3,8508	580	3,7913	740	3,7076	900	3,5922
110	3,8577	270	3,8750	430	3,8486	590	3,7983	750	3,6955	910	3,5796
120	3,8530	280	3,8648	440	3,8475	600	3,7863	760	3,6908	920	3,5692
130	3,8565	290	3,8754	450	3,8618	610	3,7885	770	3,6857	930	3,5567
140	3,8518	300	3,8754	460	3,8477	620	3,7804	780	3,6817	940	3,5507
150	3,8605	310	3,8490	470	3,8364	630	3,7714	790	3,6748	950	3,5404
160	3,8557	320	3,8696	480	3,8484	640	3,7697	800	3,6758	960	3,5353
170	3,8680	330	3,8643	490	3,8357	650	3,8207	810	3,6576		

Fuente: Autor

Tabla 52. Resultados correspondientes al número promedio de transmisiones de preámbulos con diferentes valores de BI y un valor de $T_{RAO} = 1$ ms para un escenario de tráfico de 30000 dispositivos MTC.

Tráfico de 30000 dispositivos MTC											
BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k	BI [ms]	k
20	4,1185	180	4,1594	340	4,1900	500	4,2015	660	4,1788	820	4,1581
30	4,1282	190	4,1576	350	4,1869	510	4,2003	670	4,1842	830	4,1529
40	4,1317	200	4,1632	360	4,1948	520	4,1922	680	4,1866	840	4,1470
50	4,1301	210	4,1697	370	4,1944	530	4,2045	690	4,1809	850	4,1470
60	4,1257	220	4,1633	380	4,1833	540	4,1969	700	4,1744	860	4,1390
70	4,1363	230	4,1702	390	4,1908	550	4,1944	710	4,1752	870	4,1338
80	4,1426	240	4,1631	400	4,1903	560	4,1973	720	4,1756	880	4,1341
90	4,1454	250	4,1767	410	4,1972	570	4,1990	730	4,1738	890	4,1247
100	4,1526	260	4,1768	420	4,1985	580	4,1942	740	4,1737	900	4,1247
110	4,1557	270	4,1710	430	4,1943	590	4,1857	750	4,1663	910	4,1201
120	4,1473	280	4,1762	440	4,1956	600	4,1883	760	4,1625	920	4,1157
130	4,1757	290	4,1832	450	4,1963	610	4,1895	770	4,1592	930	4,1153
140	4,1523	300	4,1839	460	4,2027	620	4,1954	780	4,1672	940	4,1064
150	4,1504	310	4,1901	470	4,2036	630	4,1835	790	4,1536	950	4,1071
160	4,1619	320	4,1757	480	4,2061	640	4,1773	800	4,1565	960	4,0845
170	4,1545	330	4,1708	490	4,1978	650	4,1842	810	4,1492		

Fuente: Autor