



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

**Análisis de la Antigüedad de la Información (AoI) en una red celular IoT  
para garantizar comunicaciones fiables en entornos sincronizados**

**Trabajo de Titulación para optar al título de:  
Ingeniera en Telecomunicaciones**

**Autor:**

Vargas Cárdenas Angie Melissa

**Tutor:**

PhD. Luis Patricio Tello Oquendo

**Riobamba, Ecuador. 2026**

## DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, Angie Melissa Vargas Cárdenas, con cédula de ciudadanía 0930810668, autora del trabajo de investigación titulado: **Análisis de la Antigüedad de la Información (AoI) en una red celular IoT para garantizar comunicaciones fiables en entornos sincronizados**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

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

En Riobamba, 08 de mayo de 2026.



---

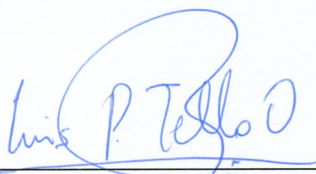
Angie Melissa Vargas Cárdenas

C.I.:0930810668

## DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Luis Patricio Tello Oquendo catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: **Análisis de la Antigüedad de la Información (AoI) en una red celular IoT para garantizar comunicaciones fiables en entornos sincronizados**, bajo la autoría de Angie Melissa Vargas Cárdenas; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 18 días del mes de febrero de 2026.



---

PhD. Luis Patricio Tello Oquendo

C.I: 0604235242

## CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **Análisis de la Antigüedad de la Información (AoI) en una red celular IoT para garantizar comunicaciones fiables en entornos sincronizados** por **Angie Melissa Vargas Cárdenas**, con cédula de identidad número **093081066-8**, bajo la tutoría del Ing. Luis Tello Oquendo PhD; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba el 08 de mayo del 2026.

Deysi Vilma Inca Balseca, Mgs.  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO**



---

Alejandra Del Pilar Pozo Jara, Mgs.  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**



---

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



---



# CERTIFICACIÓN

Que, **VARGAS CÁRDENAS ANGIE MELISSA** con CC: **093081066-8**, estudiante de la Carrera **TELECOMUNICACIONES**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**ANÁLISIS DE LA ANTIGÜEDAD DE LA INFORMACIÓN (AOI) EN UNA RED CELULAR IOT PARA GARANTIZAR COMUNICACIONES FIABLES EN ENTORNOS SINCRONIZADOS**", cumple con el 0% de similitud y 9% de Inteligencia Artificial, de acuerdo con el reporte del sistema Anti plagio **COMPILATION MAGISTER**, porcentaje aceptado de acuerdo con la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 15 de abril de 2026



Firmado electrónicamente por:

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

Validar únicamente con FirmaEC

---

Luis Patricio Tello Oquendo, PhD.  
**TUTOR PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

## **DEDICATORIA**

Con todo mi cariño, dedico este trabajo a mis padres, por su apoyo incondicional, por el esfuerzo que han hecho por mí y por acompañarme siempre. Gracias por brindarme estabilidad, confianza y motivación para seguir adelante en cada etapa de mi formación.

A mis hermanas, por su apoyo y por estar presentes de distintas maneras a lo largo de este proceso. Asimismo, dedico este logro a Cristopher, por su apoyo y por estar a mi lado cuando más lo necesité, y a Martín, por su amistad y su ánimo constante, incluso a la distancia.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, expreso mi agradecimiento a mi tutor, PhD. Luis Patricio Tello Oquendo, por su guía y el seguimiento constante durante el desarrollo de este trabajo. De igual forma, agradezco a la docente Deysi Inca por su paciencia, su apoyo y su disposición para orientarme en este proceso.

También agradezco a mi familia por estar presente en cada etapa de mi vida, por confiar en mí incluso cuando llegué a dudarlo y por el esfuerzo que han realizado para que pudiera continuar con mi formación. De la misma manera, agradezco a todas las personas que, con un consejo o una palabra de ánimo me ayudaron a mantener el enfoque y avanzar en los momentos más difíciles.

Finalmente, agradezco a Dios por ser mi guía y por darme la fortaleza para seguir adelante.

## ÍNDICE GENERAL

**DECLARATORIA DE AUTORÍA**

**DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR**

**CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL**

**CERTIFICADO ANTIPLAGIO**

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTO**

**ÍNDICE GENERAL**

**ÍNDICE DE TABLAS**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**RESUMEN**

**ABSTRACT**

<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>14</b>
1.1. Introducción.....	14
1.2. Antecedentes.....	15
1.3. Planteamiento del problema .....	16
1.4. Justificación .....	16
1.5. Objetivos.....	17
1.5.1. Objetivo general .....	17
1.5.2. Objetivos específicos .....	17
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>18</b>
2. MARCO TEÓRICO .....	18
2.1. Estado del arte .....	18
2.2. Términos y definiciones .....	19
2.3. Red Celular IoT .....	20
2.3.1. Desarrollo y estructura de las redes celulares IoT .....	21
2.4. Estándares 3GPP: Alcances de las Releases 19 y 20.....	21
2.4.1. Evolución de 5G-Advanced hacia 6G .....	22
2.4.2. Avances del 3GPP en redes IoT .....	22
2.4.3. Enfoque en IoT masivo y métricas de actualización .....	23
2.5. ¿Qué es la Antigüedad de la Información (AoI)?.....	23
2.5.1. Definición formal y comportamiento estocástico de la AoI.....	24

2.5.2.	Probabilidad de acceso satisfactorio.....	25
2.6.	Acceso Aleatorio en Redes 4G y 5G.....	25
2.6.1.	Procedimiento de Acceso Aleatorio Basado en Contención.....	26
2.6.2.	Mejoras del Acceso Aleatorio en 5G para mMTC.....	27
2.7.	Usuarios sincronizados y la información en IoT.....	27
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>.....</b>	<b>28</b>
3.	METODOLOGÍA.....	28
3.1.	Tipo de Investigación.....	28
3.2.	Diseño de Investigación.....	28
3.3.	Técnicas de recolección de Datos.....	29
3.3.1.	Observación.....	29
3.3.2.	Revisión Bibliográfica.....	29
3.4.	Población de estudio y tamaño de muestra.....	29
3.4.1.	Población de estudio.....	29
3.4.2.	Tamaño de muestra.....	29
3.5.	Operacionalización de las variables.....	30
3.6.	Métodos de análisis y procesamiento de datos.....	30
3.6.1.	Modelo del sistema.....	30
3.6.2.	Arquitectura general del sistema simulado.....	31
3.6.3.	Generación del tráfico MTC: Escenario $\Phi 1$ .....	32
3.6.4.	Procedimiento de acceso aleatorio (RACH) implementado.....	32
3.6.5.	Bloque de control de actualizaciones por usuario.....	33
3.6.6.	Cómo se registra la AoI en la estación base.....	34
3.6.7.	Cálculo de métricas por dispositivo.....	35
<b>CAPÍTULO IV</b>	<b>.....</b>	<b>36</b>
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
4.1.	Diagrama del procedimiento aplicado en los resultados.....	36
4.2.	Resultados del comportamiento temporal del sistema.....	37
4.3.	Evaluación del Rendimiento del Sistema.....	38
4.3.1.	Resultados del análisis del rendimiento del sistema a través de la probabilidad de transmisión.....	38
4.3.2.	Resultados de la evaluación de AoI promedio y AoI pico bajo barrido N y U39.....	
4.4.	Análisis estadístico del comportamiento de la Antigüedad de la Información ...	40
4.4.1.	Esquema metodológico del análisis estadístico.....	40

4.4.2. Análisis estadístico del comportamiento de la Antigüedad de la Información bajo variaciones de carga .....	41
4.4.3. Análisis comparativo de la Antigüedad promedio y pico.....	47
4.4.4. Interpretación de resultados.....	49
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>50</b>
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>50</b>
5.1. Conclusiones.....	50
5.2. Recomendaciones .....	51
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>52</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>54</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Operacionalización de variables .....	30
<b>Tabla 2</b> Datos y parámetros del escenario evaluado.....	41
<b>Tabla 3</b> AoI promedio y AoI pico: mediana e IQR por N.....	42
<b>Tabla 4</b> Revisión de supuestos del modelo para AoI promedio y AoI pico .....	43
<b>Tabla 5</b> Pruebas aplicadas para comparar niveles de N.....	43
<b>Tabla 6</b> Resultados de la diferencia significativa AoI pico vs AoI promedio según N.....	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Concepto de IoT masivo conectado mediante red celular (4G/5G).....	20
<b>Figura 2</b> Evolución de los estándares 3GPP desde Release 15 hasta Release 20.....	22
<b>Figura 3</b> Evolución típica de la Antigüedad de la Información (AoI) en función del tiempo. .....	24
<b>Figura 4</b> Procedimiento de acceso aleatorio basado en contención (mensajes Msg1–Msg4) entre un dispositivo M2M y la estación base. ....	26
<b>Figura 5</b> Modelo del sistema propuesto .....	31
<b>Figura 6</b> Arquitectura del sistema con tráfico MTC sincronizado y tráfico H2H.....	32
<b>Figura 7</b> Diagrama de flujo del procedimiento RACH implementado en el simulador....	33
<b>Figura 8</b> Bloque de control de actualizaciones por usuario.....	34
<b>Figura 9</b> Estructura general del análisis de resultados del sistema.....	36
<b>Figura 10</b> Antigüedad de la Información AoI para $N = 20$ y $U = 20$ : (a) trayectorias por usuario, (b) AoI del sistema.....	37
<b>Figura 11</b> AoI para $N = 150$ y $U = 20$ : (a) trayectorias por usuario, (b) AoI del sistema. .	37
<b>Figura 12</b> Probabilidad de transmisión exitosa ( $P_s$ ) en función de la tasa de actualización $U$ para distintos valores de $N$ . (a) Vista general del sistema. (b) Detalle ampliado de la zona cercana a $P_s = 1$ .....	38
<b>Figura 13</b> Comparación entre AoI promedio y AoI pico para distintos valores de $N$ al variar la tasa de actualización $U$ . ....	39
<b>Figura 14</b> Diagrama de flujo del análisis estadístico de la AoI.....	40
<b>Figura 15</b> Diferencias significativas en AoI promedio (Tukey).....	44
<b>Figura 16</b> Diferencias significativas en AoI pico (Dunn). ....	45
<b>Figura 17</b> Diagrama de caja del AoI promedio del sistema por nivel de carga $N$ .....	46
<b>Figura 18</b> Diagrama de caja del AoI pico del sistema por nivel de carga $N$ .....	46
<b>Figura 19</b> Tendencia AoI promedio vs AoI pico.....	48
<b>Figura 20</b> Boxplot comparativo de AoI promedio y pico según el número de dispositivos $N$ .....	48

## RESUMEN

En los últimos años, cada vez hay más dispositivos conectados a internet tales como sensores, medidores inteligentes, equipos industriales, entre otros. Muchos de ellos usan redes de comunicación celular (utilizando tecnologías como 4G o 5G) para enviar mensajes de forma periódica. Cuando hay muchos equipos enviando información a la red al mismo tiempo, sobre todo en sistemas en los cuales todos transmiten de manera sincronizada, el canal de acceso se satura, se generan colisiones y los mensajes empiezan a retrasarse o perderse. En estos casos, no se trata solo de la velocidad de la red; también importa si los datos que recibe el sistema subyacente llegan lo suficientemente actualizados (no son obsoletos). Por esta razón, junto con la probabilidad de que una transmisión sea exitosa, se estudia la Antigüedad de la Información como forma de medir qué tan recientes son los datos que llegan. Para ello se diseña un modelo de simulación en MATLAB que imita el comportamiento del procedimiento de acceso aleatorio de una red LTE/5G con distintos números de dispositivos IoT y diferentes cantidades de actualizaciones generadas por dispositivo. Con estas pruebas se analiza cómo evoluciona la AoI, las retransmisiones y el acceso satisfactorio cuando la red se vuelve más densa. Los resultados sirven como base para sugerir mecanismos de control de acceso y congestión para mantener comunicaciones fiables y con información actualizada en redes celulares IoT con tráfico masivo sincronizado.

**Palabras claves:** IoT, mMTC, acceso aleatorio, RACH, Antigüedad de la Información.

## ABSTRACT

In recent years, more devices have been connected to the internet, such as sensors, smart meters, and industrial equipment. Many of them use cellular networks (such as 4G or 5G) to send messages periodically. When many devices send information to the network simultaneously, especially in systems where they all transmit synchronously, the access channel becomes saturated, collisions occur, and messages are delayed or lost. In these cases, it is not just about the network speed; it is also important whether the data received by the underlying system is sufficiently up to date (not obsolete). For this reason, along with the probability of successful transmission, the Age of Information (AoI) is studied as a measure of how recent the incoming data is. For this purpose, a MATLAB simulation model is designed to mimic the random-access procedure of an LTE/5G network with varying numbers of IoT devices and varying update rates per device. With these tests, the evolution of AoI, retransmissions, and successful access is analyzed as the network becomes denser. The results serve as a basis for suggesting access and congestion control mechanisms to maintain reliable communication and provide up-to-date information in IoT cellular networks with synchronized, high-volume traffic.

**Keywords:** IoT, mMTC, random access, RACH, Age of Information.



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

# CAPÍTULO I

## 1.1. Introducción

La expansión de la tecnología IoT en aplicaciones modernas ha impulsado la conectividad de dispositivos en redes celulares, lo cual ha venido acompañado de exigencias en cuanto a la gestión del canal de acceso y la actualidad de los datos intercambiados. Las redes móviles, inicialmente orientadas a las comunicaciones entre personas, han debido ser ajustadas para atender el comportamiento de equipos automatizados. Este tipo de tráfico, identificado como comunicaciones masivas tipo máquina (mMTC), suele coincidir en el tiempo, lo que provoca carga excesiva en el canal y demoras al momento de transmitir [1], [2].

Cuando varios dispositivos intentan enviar información al mismo instante, en especial en configuraciones sincronizadas, se generan interferencias que dificultan la llegada oportuna de los datos. Este fenómeno es más evidente en escenarios densos o de acceso masivo; a esto se suma el impacto energético de las retransmisiones, que agotan con mayor rapidez las fuentes de energía en los nodos [3].

Ante este panorama, surge la necesidad de contar con herramientas que permitan observar la vigencia de los datos más allá de métricas como el retardo promedio. Una alternativa adecuada es la antigüedad de la información (*Age of Information*, AoI), que mide el tiempo transcurrido entre la generación de un mensaje y su recepción efectiva. Esta medida combina tanto el ritmo de actualización como el tiempo de transmisión, brindando una visión más completa de cuán representativa es la información recibida respecto al estado real del sistema monitoreado [1], [4].

Diversos análisis han demostrado que aspectos como la sincronización, la cantidad de usuarios, la política de acceso al canal y el diseño del protocolo inciden directamente sobre la antigüedad de la información [2], [3]. En trabajos recientes se ha planteado el uso de modelos de simulación como mecanismo para observar el comportamiento de esta métrica en diferentes configuraciones operativas, lo cual ha permitido establecer criterios de mejora en redes con tráfico denso.

Esta investigación se orienta a asegurar la robustez de las comunicaciones en redes celulares IoT que operan de manera sincronizada a través del análisis de la Antigüedad de la Información. Para lograrlo, se han planteado como objetivos específicos: i) el diseño de un modelo de simulación de transmisión de datos en una red celular IoT que funcione en entornos sincronizados; ii) determinar la Antigüedad de la Información (AoI) y la probabilidad de transmisión exitosa como métricas de análisis de la red; y iii) evaluar el rendimiento de la red en función de su topología y métricas de análisis para garantizar comunicaciones fiables.

## 1.2. Antecedentes

En la actualidad, muchos procesos dependen de dispositivos conectados, como sensores de temperatura, medidores inteligentes, equipos industriales, entre otros. Muchos de estos equipos usan redes móviles como LTE, LTE-A, o 5G para comunicarse, de modo que las redes celulares ya no solo atienden llamadas o tráfico entre personas, sino también un gran número de dispositivos tipo máquina que comparten el mismo canal [5], [6]. Este tipo de tráfico, conocido como comunicaciones masivas tipo máquina (mMTC), genera la necesidad de revisar la manera en la que se gestiona el acceso a la red.

Cuando muchos dispositivos IoT intentan transmitir simultáneamente, el canal de acceso aleatorio (RACH) empieza a saturarse. En escenarios donde los equipos generan sus actualizaciones de manera sincronizada, la red puede saturarse y se producen colisiones, retrasos y pérdidas de paquetes. Diversos estudios han demostrado que cuando la red se congestiona, la información no llega en el momento adecuado, lo que resulta un problema cuando se requieran datos recientes para funcionar correctamente [2], [7], [8].

Además de las métricas conocidas como la latencia promedio o el throughput, distintos autores han empezado a prestar más atención a que tan actualizada está la información en el momento en que el sistema la utiliza. La AoI surge justamente con el propósito de describir cuánto tiempo ha pasado desde que se generó el último dato recibido. En [1] se introdujo formalmente este concepto, y más adelante, en [7] se amplió su análisis, mostrando que mantener la AoI bajo ciertos niveles puede ser clave en aplicaciones sensibles al tiempo. A esto se suman trabajos de revisión que estudian el comportamiento de la AoI en redes IoT masivas y en sistemas celulares, lo que refleja el interés creciente por esta métrica como herramienta de análisis y diseño [9], [10].

A partir de estas ideas, se han propuesto diferentes formas de adaptar el acceso aleatorio teniendo en cuenta la AoI. Algunos trabajos plantean esquemas de acceso que consideran el estado de actualización de los dispositivos, de modo que se otorgue prioridad a aquellos cuya información está más desfasada [4], [11]. Otros se enfocan en ajustar parámetros de red o en incorporar técnicas como la cancelación sucesiva de interferencias (*Successive Interference Cancellation*), con el objetivo de mejorar la probabilidad de acceso satisfactorio y mantener los datos lo más frescos posible, incluso cuando la red soporta una carga elevada [11], [12], [13].

En el ámbito nacional y local también se han realizado estudios relacionados con la frescura de los datos en redes celulares IoT. Se han presentado modelos para analizar el canal de acceso aleatorio utilizando la AoI como métrica principal, mecanismos de generación dinámica de actualizaciones basados en aprendizaje reforzado y diseños de redes de ultra baja potencia orientadas a mejorar la confiabilidad y el consumo energético [3], [7], [14], [15]. A pesar de estos avances, aún queda por explorar con mayor detalle qué ocurre cuando coinciden tres factores al mismo tiempo: tráfico sincronizado, acceso aleatorio en LTE/5G

y análisis de la Antigüedad de la Información en escenarios densos. En ese punto se centra la presente investigación.

### **1.3. Planteamiento del problema**

En los últimos años, la implementación de redes IoT en entornos celulares ha incrementado significativamente el volumen de dispositivos conectados, especialmente bajo esquemas de comunicación masiva tipo máquina (mMTC). Estos dispositivos suelen transmitir de forma periódica y sincronizada, lo cual genera congestión en el canal de acceso aleatorio. Este comportamiento, ampliamente observado en escenarios reales, como lo exponen [7] y [2], puede provocar retrasos, colisiones y pérdida de actualizaciones, comprometiendo la vigencia de la información transmitida.

Distintas investigaciones han posicionado a la AoI como una alternativa viable para analizar la actualización efectiva de los datos, en lugar de depender únicamente de métricas como la latencia. Kaul et al.[1] fue quién formuló por primera vez la métrica conocida como Antigüedad de la Información y ampliada por Kosta et al. [16], quienes demostraron que un control eficiente del AoI permite mejorar la fiabilidad de los sistemas en aplicaciones sensibles al tiempo. Se ha observado en diversos estudios que el comportamiento del AoI depende de varios factores, entre ellos, la política de acceso, la tasa de generación de actualizaciones y la sincronía entre dispositivos [9].

En respuesta a estas limitaciones, se han propuesto esquemas de acceso aleatorio sensibles al AoI, como el desarrollado por Zhu et al. [4], que permite reducir significativamente la antigüedad de la información mediante programación basada en estados de actualización. Adicionalmente, Chen et al. [11] ha abordado el problema desde enfoques de optimización del acceso y técnicas como la cancelación sucesiva de interferencias (SIC), evidenciando mejoras notables en la entrega efectiva de los datos.

A pesar de estos avances, persisten vacíos en el estudio del AoI bajo condiciones reales en redes celulares IoT, particularmente cuando se combinan sincronización, acceso aleatorio y variabilidad topológica [17]. Por ello, se plantea desarrollar un modelo de simulación que permita analizar el comportamiento de la antigüedad de la información y la probabilidad de transmisión exitosa en un entorno con dispositivos sincronizados, con el objetivo de proponer estrategias que garanticen comunicaciones fiables y actualizadas.

### **1.4. Justificación**

Las redes celulares que integran dispositivos IoT enfrentan condiciones complejas cuando deben manejar transmisiones de datos generadas de forma sincronizada por múltiples nodos. Este comportamiento, común en sistemas mMTC, puede generar sobrecarga en el canal de acceso aleatorio y ocasionar demoras, colisiones o pérdidas de actualizaciones, afectando la

calidad de la información recibida. En contextos donde se requiere que los datos estén disponibles con mínima latencia y actualizados, resulta necesario comprender cómo estos factores comprometen la estabilidad y el rendimiento del sistema [2], [7].

En este tipo de redes, el indicador que mejor permite evaluar la vigencia de la información es la AoI. Esta métrica cuantifica el tiempo transcurrido entre la generación de un paquete y su recepción, permitiendo valorar si la información entregada sigue siendo útil en función del momento en que llega. A diferencia de otras métricas tradicionales, el AoI pone el énfasis en la vigencia de los datos en el receptor, aspecto crítico para aplicaciones de supervisión remota, sistemas de control o entornos automatizados [1], [16].

Considerando esta necesidad, se propone la elaboración de un modelo de simulación que permita observar el comportamiento del AoI y la probabilidad de éxito en la transmisión en una red celular IoT bajo condiciones de tráfico sincronizado. El análisis de estas variables se realizará a partir de diferentes configuraciones de red, permitiendo identificar cómo la cantidad de dispositivos, la sincronización de los eventos de transmisión y la distribución de nodos influyen en la entrega oportuna de actualizaciones. Se busca no solo interpretar el estado de la red bajo esas condiciones, sino también proponer criterios técnicos para su mejora [9].

Las estrategias de acceso dependientes del AoI, así como los mecanismos de programación adaptativa y las mejoras en el canal de acceso, han demostrado que es posible reducir la obsolescencia de los datos y optimizar el uso de recursos disponibles. Por tanto, esta investigación se orienta a contribuir con evidencia analítica y simulada que respalde decisiones de diseño y planificación para redes celulares IoT que operen con sincronización, manteniendo así la integridad de la información recibida en el tiempo necesario para su aprovechamiento efectivo [11].

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo general**

- Analizar la Antigüedad de la información en una red celular IoT para garantizar comunicaciones fiables en entornos sincronizados.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Proponer un modelo de simulación de transmisión de datos en una red celular IoT para entornos sincronizados.
- Determinar la Antigüedad de la Información (AoI) y la probabilidad de transmisión exitosa como métricas de análisis de la red.
- Evaluar el rendimiento de la red en función de su topología y métricas de análisis para garantizar comunicaciones fiables en entornos sincronizados.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Estado del arte

Últimamente, se han realizado investigaciones orientadas a la optimización de redes en escenarios de baja latencia. Pensar en que tan a tiempo llegan las actualizaciones de estado se ha convertido en un tema de suma importancia, por eso, los estudios sobre la AoI son muy significativos. Hay algunas formas en las que se puede abordar este problema, y sus soluciones se aplican en diversas áreas, como redes de sensores que vigilan la temperatura o la contaminación, o todo lo que abarca el internet de las cosas (IoT).

Se han presentado modelos alternativos por parte de varios investigadores tanto a nivel local, nacional e internacional, cada uno con diferentes enfoques. Por ejemplo, en [1] se analizó la AoI en sistemas con fuentes periódicas de actualización, estableciendo límites teóricos para su comportamiento. Más adelante, en [2] se creó un modelo de simulación con hasta 140 dispositivos mMTC conectados a una red LTE-A, estableciendo la relación entre la frecuencia de envío y la congestión del canal. Su trabajo propone un mecanismo de control distribuido para mejorar la entrega de información sin generar colisiones. En la misma línea, trabajos como [4], [8] y [10] presentan esquemas de acceso aleatorio que tienen en cuenta la AoI y el estado de las actualizaciones, con el objetivo de reducir la AoI y aliviar la carga del canal en redes IoT masivas bajo condiciones de alta densidad de usuarios.

A nivel nacional, [7] propuso un modelo de simulación orientado al canal de acceso aleatorio en redes móviles, utilizando la métrica AoI. Su trabajo caracterizó varias formas de generar actualizaciones para encontrar un equilibrio entre actualización y el uso del canal. En el ámbito local, se han desarrollado varios estudios que abordan el manejo de la información en redes IoT. Por ejemplo, en [3] se creó un modelo donde los dispositivos no solo mandan actualizaciones, sino que lo hacen de forma más inteligente usando aprendizaje reforzado (Q-Learning). Su idea principal fue reducir la antigüedad sin saturar el canal de acceso. Del mismo modo, en [14] se diseñó una red que usa una tecnología de radio de muy bajo consumo, en donde plantea un protocolo MAC eficiente para escenarios mMTC. Mientras que, en [15] se analizó el proceso de “rampa de potencia” en redes LTE para que los dispositivos tuvieran más éxito al conectarse. Además, en [18] se estudió el rendimiento del canal de acceso aleatorio en la tecnología NB-IoT para comunicaciones M2M, poniendo énfasis en la probabilidad de acceso satisfactorio en escenarios de alta carga.

Cada aporte mencionado anteriormente contribuye un aspecto diferente con respecto a incrementar la transmisión satisfactoria de información en redes celulares, considerando diferentes enfoques como el incremento en la potencia de transmisión, disminución de generación de mensajes y la actualización automática de parámetros de red. Las investigaciones existentes apuntan a lo mismo: manejar la congestión en la red para entregar datos con precisión y que la información esté siempre al día. La contribución de este estudio

radica en redes celulares IoT con dispositivos que generan actualizaciones de forma sincronizada. Específicamente se emplea un modelo de acceso aleatorio LTE/5G, variando la cantidad de dispositivos y sus frecuencias de actualización, para investigar cómo incide esto en la AoI y la probabilidad de acceso exitoso. La finalidad es cuantificar o describir la relación entre que tan nuevos son los datos y la congestión del canal en redes densas. Esto representa un aporte significativo porque escenarios con tráfico sincronizado no han sido muy explorados en la comunidad científica.

## 2.2. Términos y definiciones

**3GPP:** Es un grupo internacional que define los estándares de las redes móviles, desde 3G hasta las tecnologías más recientes como 5G y 6G. Sus documentos, llamados *Releases*, establecen las mejoras que siguen las operadoras y fabricantes.

**RACH:** Canal de acceso aleatorio que permite a los dispositivos comunicarse por primera vez con la red. Es decir, es el punto de inicio de la conexión, antes de que se asignen los recursos para la transmisión de datos.

**RAP:** Es un proceso de acceso aleatorio que sigue un dispositivo para iniciar la conexión con la red a través del canal RACH. Incluye el envío de mensajes iniciales y la confirmación de conexión con la estación base.

**mMTC:** Hace referencia a un tipo de comunicación donde miles de dispositivos IoT se conectan de manera simultánea, enviando pequeñas cantidades de información.

**AoI:** Antigüedad de la información, medida que indica cuánto tiempo ha pasado desde que se generó el último dato recibido y válido en el sistema. Mientras menor sea ese valor, más actualizada se considera la información que está usando la red.

**Usuarios sincronizados:** Dispositivos que generan y envían sus actualizaciones en instantes muy cercanos entre sí. Esta coincidencia puede aumentar las colisiones y la congestión en el canal de acceso, lo que afecta la entrega de la información.

**Usuarios no sincronizados:** Dispositivos que envían sus actualizaciones en momentos distintos. Esto ayuda a repartir el tráfico en el tiempo y suele reducir la congestión del canal.

**Latencia:** Tiempo que tarda un paquete de datos en llegar desde el dispositivo que lo envía hasta el receptor. Una menor latencia permite que la información llegue más rápido y sea más útil para el sistema.

**Throughput:** Cantidad de datos que la red logra transmitir correctamente en un intervalo de tiempo. Un mayor throughput indica que la red está aprovechando mejor sus recursos de transmisión.

**Numero de retransmisiones:** Cantidad de veces que un dispositivo debe reenviar una actualización porque no se recibió correctamente en el intento anterior. Cuando este número crece, normalmente es una señal de colisiones, congestión o fallas durante el acceso.

**Probabilidad satisfactoria:** Intentos de acceso o transmisión que terminan completándose correctamente. Se utiliza como una medida directa del rendimiento y la confiabilidad del sistema.

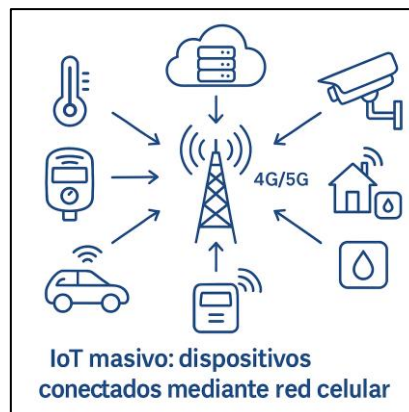
**Métrica:** Valor numérico o indicador utilizado para evaluar el desempeño de una red o de un proceso dentro de ella. En esta investigación se emplean métricas como la antigüedad de la información, latencia y *throughput* para analizar la eficiencia del sistema.

### 2.3. Red Celular IoT

Una red celular IoT es una arquitectura de comunicación que utiliza las infraestructuras móviles celulares (como LTE, LTE-A o 5G) para interconectar dispositivos de tipo máquina en el contexto del Internet de las Cosas (IoT). A diferencia de las redes diseñadas para servicios humano-a-humano (H2H), las redes IoT están orientadas a soportar un volumen masivo de dispositivos que generan pequeñas cantidades de datos de forma periódica o esporádica, con requerimientos de baja latencia, eficiencia energética y alta confiabilidad [5], [6].

3GPP ha clasificado las redes IoT en función del tipo de tráfico que manejan: Comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC), Comunicaciones críticas de tipo máquina (cMTC) e Internet de las cosas de banda ancha [6]. Las comunicaciones masivas de tipo máquina permite la conexión a gran escala de dispositivos, presenta desafíos en el uso del canal de acceso aleatorio, la asignación de recursos de radio y sincronización [19].

Una característica importante de las redes celulares IoT es que aprovechan la infraestructura móvil que ya existe. Esto permite utilizar estaciones base, canales y protocolos previamente definidos, y complementar su funcionamiento con mecanismos de control de acceso, como las barreras por clases, el manejo de RAOs y otras técnicas para adaptarse a la carga del sistema [8]. Sin embargo, el canal RACH en LTE-A fue pensado inicialmente para un número reducido de usuarios humanos y, cuando se lo somete a escenarios de mMTC, puede saturarse con rapidez. En esas condiciones suelen presentarse más colisiones, mayores retrasos y se dificulta que las actualizaciones lleguen a tiempo [8].



**Figura 1** Concepto de IoT masivo conectado mediante red celular (4G/5G).

**Fuente:** Autor

Por tanto, una red celular IoT puede entenderse como una adaptación del modelo de comunicaciones móviles tradicional, enfocada en habilitar la conectividad eficiente y escalable de miles de dispositivos MTC, con soporte para tráfico asincrónico, baja velocidad y criterios estrictos de actualización de información.

### 2.3.1. Desarrollo y estructura de las redes celulares IoT

El crecimiento del Internet de las Cosas IoT ha ido de la mano con la evolución de las redes móviles. Además, gracias a las mejoras que se introducen en LTE-A y 5G, las conexiones entre dispositivos ya no dependen de sistemas de corto alcance o fijos, actualmente se desarrollan a través de redes celulares que cubren grandes áreas y que pueden abarcar miles de equipos al mismo tiempo [5], [6].

Según el estudio publicado por Cisco IBSG, entre los años 2008 y 2009 el número de dispositivos conectados superó al número de personas conectadas a Internet, dando paso a una nueva etapa en las telecomunicaciones, conocida como la era del IoT [20].

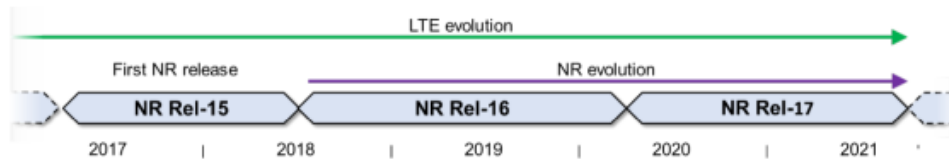
A partir de ahí, las operadoras han ajustado sus infraestructuras móviles para que puedan soportar dispositivos tipo máquina con tráfico intermitente [5], [6].

En este tipo de redes se destacan tres componentes, en donde la primera capa es la red de acceso radio (RAN) que está encargada de conectar los dispositivos al sistema mediante canales como es el caso del Random Access Channel. Luego, en la segunda capa corresponde al núcleo de red, llamado Evolved Packet Core (EPC) en LTE o en 5GC. Este componente gestiona las sesiones, autenticación y la transmisión de datos hacia la nube. Por último, la tercera capa corresponde a los dispositivos MTC como son los sensores, módulos, entre otros; encargados de recopilar y enviar la información recolectada en el entorno. [5],[6],[18].

Según el análisis desarrollado por [18], la arquitectura de NB-IoT (Narrowband Iot) que es una red que mantiene la estructura de RAN, EPC Y UE, pero agrega un esquema de acceso aleatorio optimizado que reduce las colisiones en el canal y mejora la probabilidad de conexión satisfactoria. En definitiva, estas características permiten ampliar la cobertura y disminuir el consumo energético, lo que resulta satisfactorio ya que ayuda a mantener la estabilidad y fiabilidad en la transmisión de datos M2M [18].

### 2.4. Estándares 3GPP: Alcances de las Releases 19 y 20

Las especificaciones del *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) constituyen el núcleo del desarrollo evolutivo de las redes móviles. Para satisfacer las exigencias de IoT masivo y de aplicaciones críticas en tiempo real, las Releases 19 y 20 del 3GPP han sido diseñadas para expandir las capacidades de las tecnologías 5G y establecer las bases para la próxima generación (6G) [6]. Estas fases de estandarización, actualmente en desarrollo, reflejan un enfoque centrado en la eficiencia espectral, la reducción de la latencia, la densificación de dispositivos y la sostenibilidad operativa, respondiendo así a los requisitos emergentes del ecosistema IoT en sus variantes masivas (mMTC), críticas (URLLC) y de gran ancho de banda (eMBB) [6].



**Figura 2** Evolución de los estándares 3GPP desde Release 15 hasta Release 20.

**Fuente:** [6].

#### 2.4.1. Evolución de 5G-Advanced hacia 6G

La Release 18 del 3GPP marcó el inicio de 5G-Advanced, una fase intermedia entre 5G y 6G [6]. La Release 19, con su funcionalidad definida en marzo de 2024, se enfoca en la inteligencia artificial y aprendizaje automático aplicados a redes de acceso por radio (RAN), IoT ambiental, posicionamiento extremo y nuevas arquitecturas de acceso múltiple [6]. Por su parte, la Release 20, proyectada como fase preparatoria para 6G (también conocida como IMT-2030), contempla capacidades aún más disruptivas como comunicaciones integradas y sensado (ISAC), un uso extendido de redes no terrestres (NTN), y la integración nativa de aprendizaje automático en funciones de red [6].

De acuerdo con el 3GPP, las mejoras introducidas en NR y LTE buscan ampliar la cobertura y hacer más eficiente la operación de la red, con el fin de mantener conectividad para dispositivos IoT incluso en situaciones de movilidad o en zonas de difícil acceso [6]. Esto cobra mayor importancia en escenarios mMTC, donde muchos dispositivos deben compartir los recursos de red en lapsos cortos y con necesidad de enviar actualizaciones con frecuencia [6].

#### 2.4.2. Avances del 3GPP en redes IoT

Las versiones más recientes del 3GPP mejoró y optimizó el acceso y la gestión del tráfico masivo en dispositivos IoT. En el informe técnico TR 23.700 [21] menciona nuevas características con respecto al control en la red de acceso (RAN) que busca mitigar la saturación del canal RACH e incrementar la eficiencia y potencia la vigencia de los datos en entornos mMTC.

Entre las principales medidas se incluyen la planificación dinámica de recursos, las barreras de clase adaptativas (ACB) y la segmentación del acceso por tipo de dispositivo. Estas estrategias permiten distribuir el acceso según la carga y prioridad de cada equipo. En consecuencia, evita retrasos y ayuda a mantener la vigencia temporal de los datos, con relación a la métrica AoI [6], [21].

De igual forma, en entornos mMTC se ha comprobado que en NB-IoT, la eficiencia de estas técnicas está condicionada por el control de gestión y de los mecanismos de acceso implementados [22].

### 2.4.3. Enfoque en IoT masivo y métricas de actualización

Una característica común en ambas Releases es el énfasis en habilitar nuevos modelos de servicio para el IoT. En el caso de 5G-Advanced (Releases 18 y 19), se introdujeron mejoras en el acceso aleatorio, planificación dinámica y barreras de clase (ACB) optimizadas para la contención masiva de dispositivos [6]. En la Release 20, estos mecanismos se amplían con soporte para dispositivos de ultrabajo consumo, segmentación de acceso basada en la criticidad del dato, y nuevos indicadores de actualización como la *Age of Information* (AoI), incorporada en el planeamiento de actualizaciones periódicas [6].

Además, el informe técnico TR 23.700 considera escenarios con distintas clases de dispositivos IoT, que acceden a la red en momentos no sincronizados y bajo patrones de tráfico diferentes. En estos casos se analiza cómo cambia el acceso cuando varios equipos intentan conectarse al mismo tiempo y se evalúan condiciones más cercanas a un entorno real de operación [22].

### 2.5. ¿Qué es la Antigüedad de la Información (AoI)?

En las redes de comunicación modernas, especialmente aquellas diseñadas para el Internet de las Cosas (IoT), la necesidad de contar con información actualizada y confiable ha impulsado el estudio de nuevas métricas que evalúen no solo el retardo o el throughput, sino también la actualización temporal de los datos. Una de las más destacadas en los últimos años es la Antigüedad de la Información (*Age of Information*, AoI), la cual ha sido introducida como una métrica que cuantifica el tiempo transcurrido desde la generación del último dato recibido por un nodo receptor [19].

A diferencia de métricas tradicionales como la latencia promedio o el jitter, la AoI considera tanto el tiempo entre actualizaciones como el retardo asociado al canal de transmisión. Esto resulta especialmente relevante en escenarios con tráfico tipo máquina (MTC), donde las actualizaciones de estado se generan de forma periódica o aleatoria, y donde mantener la información fresca tiene un impacto directo en la toma de decisiones, monitoreo remoto o control automático [2], [23].

En la práctica, mantener bajo el valor de AoI significa que el sistema receptor opera con información reciente, mientras que un valor elevado refleja desactualización potencialmente crítica. Esta métrica ha demostrado ser más representativa en sistemas donde lo fundamental no es únicamente la llegada de datos, sino la vigencia temporal de dichos datos para que puedan ser utilizados eficazmente [19].

### 2.5.1. Definición formal y comportamiento estocástico de la AoI

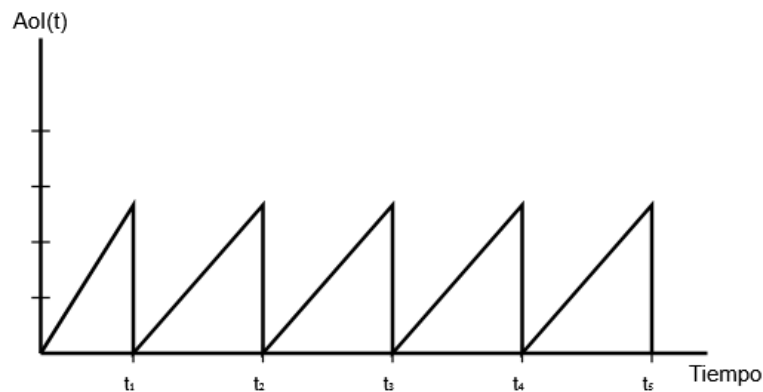
Formalmente, la AoI se define como la diferencia entre el tiempo actual  $t$  y el instante  $u(t)$  en el que fue generada la última actualización de estado recibida:

$$AoI(t) = t - u(t) \quad 1$$

Donde:

- $u(t)$  la marca de tiempo de la última actualización recibida antes del instante  $t$ .

El proceso  $AoI(t)$  crece linealmente en el tiempo hasta que llega una nueva actualización, momento en el cual su valor cae abruptamente al retardo con el que fue recibida dicha actualización. Esto genera un patrón en forma de diente de sierra, característico en la representación gráfica de esta métrica [19].



**Figura 3** Evolución típica de la Antigüedad de la Información (AoI) en función del tiempo.

**Fuente:** Autor

Se puede definir también el valor promedio de AoI durante un intervalo de observación  $[0, T]$  mediante la siguiente expresión integral:

$$\overline{AoI} = \frac{1}{T} \int_0^T AoI(t) dt \quad 2$$

Este promedio representa el área bajo la curva del proceso AoI dividido por la duración total del intervalo observado. De este modo, permite comparar distintos esquemas de actualización o políticas de acceso al medio en términos de actualización general de la información entregada al sistema [24].

En redes celulares IoT, mantener la métrica AoI dentro de rangos aceptables se convierte en un desafío al existir colisiones, pérdidas de paquetes, acceso no exitoso o retrasos producto del canal compartido. En consecuencia, esta métrica no solo es útil como indicador de rendimiento, sino también como criterio de optimización en protocolos MAC, algoritmos de control de tráfico o esquemas de priorización de actualizaciones [2], [23].

### 2.5.2. Probabilidad de acceso satisfactorio

Además de la Antigüedad de la Información, en este estudio se utiliza otra métrica para describir el comportamiento del acceso aleatorio; la probabilidad de acceso satisfactorio. Esta medida indica qué parte de los intentos de acceso consigue realmente establecer conexión con la red.

De forma simple, la probabilidad de acceso satisfactorio  $P_s$  se define como:

$$P_s = \frac{N_{\text{éxitos}}}{N_{\text{intentos}}} \quad 3$$

donde:

- $N_{\text{éxitos}}$  es el número de accesos que completan todo el procedimiento RACH sin colisión ni fallo, y
- $N_{\text{intentos}}$  es el número total de intentos de acceso realizados por los dispositivos.

Cuando  $P_s$  toma valores altos, significa que la mayoría de los dispositivos logra conectarse sin problemas. En cambio, valores bajos indican que hay muchas colisiones o que el canal de acceso se encuentra saturado [4].

## 2.6. Acceso Aleatorio en Redes 4G y 5G

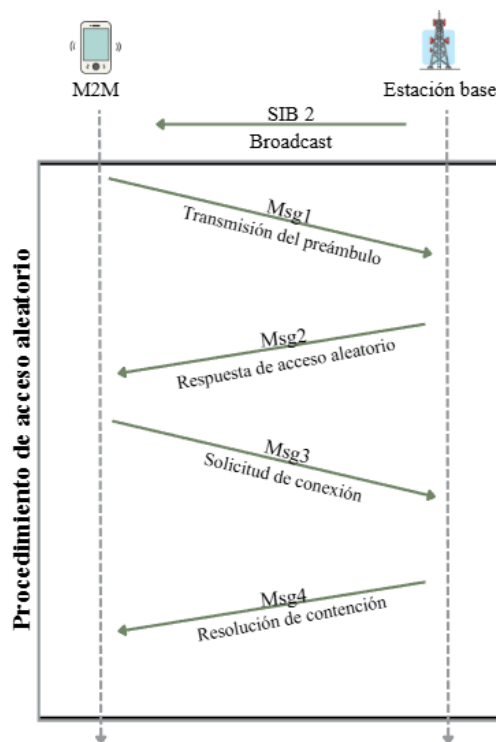
El acceso aleatorio es el procedimiento mediante el cual un dispositivo intenta establecer comunicación inicial con la red sin requerir una asignación previa de recursos. Este mecanismo es esencial en redes celulares como LTE (4G) y NR (5G), ya que permite la conexión eficiente de usuarios nuevos o reactivación de enlaces inactivos, especialmente en entornos donde se concentra una alta densidad de dispositivos IoT [4], [25].

Tanto en LTE como en 5G, el canal utilizado para este proceso es el Random Access Channel (RACH), que opera mediante un esquema de acceso basado en contención. Esto implica que múltiples dispositivos pueden intentar acceder simultáneamente, generando colisiones que deben ser detectadas y resueltas por la estación base. A pesar de compartir principios similares, la evolución del acceso aleatorio en 5G introduce mejoras significativas que abordan los desafíos propios de las comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC) [26].

### 2.6.1. Procedimiento de Acceso Aleatorio Basado en Contención

El acceso aleatorio basado en contención consta de cuatro pasos fundamentales en redes 4G y 5G, conocidos como Msg1 a Msg4:

1. **Msg1 – Envío del preámbulo aleatorio:** el dispositivo selecciona de forma aleatoria un preámbulo de un conjunto predefinido y lo transmite al nodo base (gNB o eNB).
2. **Msg2 – Respuesta del nodo base:** la red responde con un mensaje de asignación temporal y sincronización, conocido como RAR (Random Access Response).
3. **Msg3 – Solicitud de conexión:** el dispositivo envía su identidad o petición de recursos, utilizando los recursos temporales asignados.
4. **Msg4 – Confirmación de conexión:** la estación base responde confirmando el éxito del acceso y asignando un identificador definitivo al usuario [4], [25].



**Figura 4** Procedimiento de acceso aleatorio basado en contención (mensajes Msg1–Msg4) entre un dispositivo M2M y la estación base.

**Fuente:** [2]

En este tipo de acceso, las colisiones ocurren cuando varios dispositivos seleccionan el mismo preámbulo y transmiten al mismo tiempo. Las redes 4G utilizaban esquemas simples de reintento y barrera de acceso (ACB), mientras que 5G incorpora estrategias avanzadas como partición dinámica del RACH, separación de clases de tráfico y priorización basada en el tipo de aplicación [10], [27].

### 2.6.2. Mejoras del Acceso Aleatorio en 5G para mMTC

Frente al notorio incremento en la concentración de dispositivos conectados, especialmente en entornos como ciudades inteligentes y áreas de automatización industrial, las redes 5G han tenido que idear nuevos enfoques para una gestión de acceso más eficiente. Destacan:

- **Acceso configurado (configured grant):** Permite la reserva proactiva de recursos para ciertos terminales, eludiendo la ineficiencia del acceso aleatorio convencional.
- **Segmentación del RACH según el tipo de dispositivo:** Implica la asignación de configuraciones distintas para el preámbulo y periodos de transmisión a diferentes categorías de dispositivos (sensores, equipos móviles, dispositivos de misión crítica). Esto contribuye a un uso más eficaz del canal y, consecuentemente, a una mejor calidad de servicio.
- **Asignación basada en prioridad y carga:** donde el gNB ajusta dinámicamente la cantidad de oportunidades de acceso dependiendo de la demanda actual del sistema [8], [17].

### 2.7. Usuarios sincronizados y la información en IoT

En redes IoT de tipo masivo (mMTC), la sincronización en la generación de actualizaciones por parte de los dispositivos tiene un impacto directo sobre la AoI. Debido a la transmisión sincronizada de datos por parte de los usuarios, que ocurre en el momento, una saturación propensa a que ocurran colisiones en el canal de acceso aleatorio. Esto no solo repercute en un mayor número de retransmisiones, sino que también prolonga el retardo y compromete la vigencia de la información recibida [2], [3]. Por otro lado, la distribución aleatoria de los envíos, propia de los usuarios no sincronizados, contribuye a reducir la saturación, un factor determinante en entornos con alta densidad de dispositivos.

Estudios basados en simulación han demostrado que el patrón de generación de paquetes influye significativamente en las métricas [7] de rendimiento. En particular, los esquemas con desfases aleatorios (como el escenario Phi2) mantienen valores de AoI más bajos bajo carga creciente, mientras que los escenarios sincronizados (como Phi1) presentan saturación temprana del canal [7]. Por ello, es recomendable incorporar mecanismos que diversifiquen temporalmente las transmisiones o que adapten dinámicamente la tasa de envío según la carga, como estrategias basadas en aprendizaje reforzado [23].

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Tipo de Investigación

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo, ya que su propósito es la obtención y análisis de datos numéricos derivados de la simulación computacional de una red celular IoT en condiciones de tráfico masivo. El estudio se orienta al análisis del comportamiento de la métrica AoI, así como de la probabilidad de acceso exitoso ( $P_s$ ), a partir de diversas configuraciones de dispositivos en un entorno simulado bajo MATLAB en entornos sincronizados.

Se considera una investigación aplicada, dado que se hace uso del conocimiento técnico adquirido para modelar y evaluar soluciones a una problemática concreta dentro del ámbito de las telecomunicaciones: la eficiencia del acceso aleatorio y la vigencia de los datos en escenarios de mMTC.

Asimismo, se adopta un carácter exploratorio y descriptivo, ya que se investiga un fenómeno con escasa exploración previa a nivel local, aplicando simulaciones por eventos discretos con parámetros definidos como el número de dispositivos (entre 10 y 150) y la cantidad de actualizaciones por dispositivo (de 5 a 50, en saltos de 5), permitiendo describir con precisión el impacto que estos factores tienen sobre las métricas de rendimiento en una red celular IoT.

#### 3.2. Diseño de Investigación

El primer objetivo de esta investigación consiste en proponer un modelo de simulación que reproduzca de manera realista el comportamiento de una red celular LTE/5G cuando múltiples dispositivos IoT generan actualizaciones de forma sincronizada. La intención es capturar lo que ocurre dentro del canal de acceso aleatorio (RACH) cuando un gran número de equipos intenta transmitir al mismo tiempo, considerando además la presencia de tráfico humano (H2H), tal como sucede en una radiobase comercial.

La simulación fue implementada en MATLAB mediante un enfoque de eventos discretos, donde cada acción relevante envió de preámbulo, detección de colisiones, esperas, retransmisiones y confirmación final que ocurre en instantes específicos del tiempo simulado. Este enfoque permite analizar con detalle los retrasos que experimentan las actualizaciones, la cantidad de reintentos y las colisiones que se producen en escenarios con alta densidad de usuarios.

### **3.3. Técnicas de recolección de Datos**

#### **3.3.1. Observación**

La técnica utilizada para la recolección de información es la observación estructurada a través del entorno de simulación. Esta técnica permite registrar los datos generados por los experimentos virtuales en MATLAB, tales como: instantes de generación y llegada de paquetes, número de retransmisiones por usuario, tiempos de espera en el acceso y el valor de la AoI en cada escenario simulado. Los resultados son almacenados en matrices que posteriormente se analizan mediante herramientas estadísticas para su interpretación gráfica y comparativa.

#### **3.3.2. Revisión Bibliográfica**

Se consultó bibliografía relacionada con AoI en redes celulares IoT y con el acceso aleatorio bajo carga. Con base en esas referencias se eligieron las métricas, la antigüedad promedio, la antigüedad pico y la probabilidad de transmisión exitosa, y se definió cómo analizar el efecto del número de dispositivos y de las actualizaciones por usuario para la demostración e interpretación de resultados.

### **3.4. Población de estudio y tamaño de muestra**

#### **3.4.1. Población de estudio**

La población en esta investigación se define como el conjunto de dispositivos IoT ( $N$ ) que intentan acceder a la red celular a través del canal de acceso aleatorio (RACH). Las pruebas consideran valores de  $N$  desde 10 hasta 150 unidades, representando así diferentes niveles de carga en la red y cada equipo produce de 5 a 50 actualizaciones, siguiendo un patrón de emisión de frecuencia fija y sincronizada. Este esquema permite observar con mayor claridad el comportamiento del sistema cuando las transmisiones se organizan bajo condiciones de tráfico sincronizado y predecible.

#### **3.4.2. Tamaño de muestra**

La muestra está conformada por las actualizaciones que han logrado transmitirse exitosamente hacia la estación base, cumpliendo con el proceso completo de acceso aleatorio. Solo aquellas actualizaciones que logran finalizar el procedimiento RACH sin colisión ni pérdida son consideradas válidas para el análisis. Estas transmisiones exitosas permiten evaluar el rendimiento de la red mediante las métricas de la AoI, probabilidad de acceso satisfactorio ( $P_s$ ) y retardo total, bajo distintas configuraciones de carga.

### 3.5. Operacionalización de las variables

Variable	Concepto	Indicadores	Técnicas e instrumentos
<b>Independiente</b>			
Topología de red	Organización de los dispositivos IoT en la red celular. Incluye el número de nodos, frecuencia de actualización y forma de acceso al canal.	-Número de dispositivos simulados -Número de actualizaciones por dispositivo	Configuración en el simulador por eventos discretos en MATLAB; se varía la cantidad de nodos en la red y la frecuencia de actualizaciones.
<b>Dependiente</b>			
Antigüedad de la Información (AoI)	Métrica que mide el tiempo transcurrido entre la generación de una actualización por el dispositivo y su recepción por el sistema receptor.	- AoI promedio y AoI pico	Observación directa en el modelo de simulación por eventos discretos, recolectando marcas de tiempo.
Prob. de transmisión exitosa (Ps)	Indica el porcentaje de paquetes que alcanzan su destino correctamente dentro de la red IoT, libres de colisiones o pérdidas.	- Núm. de transmisiones exitosas / Núm. intentos totales	Observación directa en el modelo de simulación por eventos discretos, recolectando información de paquetes transmitidos y recibidos con éxito.

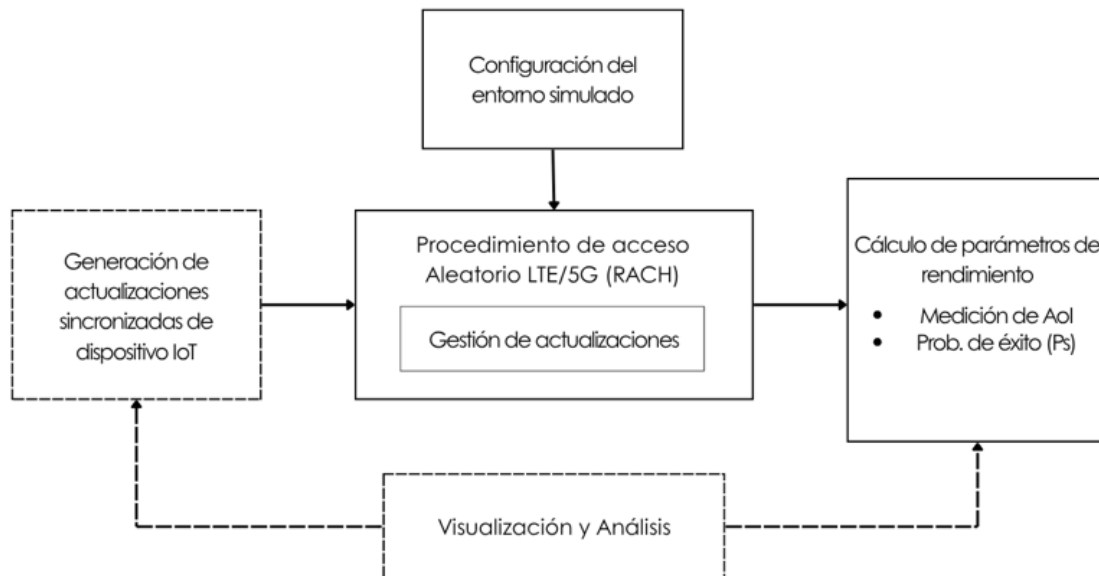
*Tabla 1 Operacionalización de variables*

*Fuente: Autor*

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

#### 3.6.1. Modelo del sistema

Para una comprensión más clara del funcionamiento general del sistema simulado, se emplea el siguiente diagrama de bloques, el cual ilustra los componentes principales que interactúan en el análisis de la métrica AoI en una red celular IoT masiva. En primer lugar, se generaron las actualizaciones periódicas de los dispositivos IoT para representar el tráfico sincronizado del sistema. Luego se ejecutó el procedimiento de acceso aleatorio LTE/5G (RACH), considerando la posibilidad de colisiones entre dispositivos. Después se continuó con la transmisión de las actualizaciones que lograron acceder, y con esa información se calcularon las métricas de rendimiento: la AoI promedio del sistema, la antigüedad pico y la probabilidad de transmisión exitosa. Finalmente, los resultados se organizaron y se analizaron para describir el comportamiento del sistema bajo diferentes niveles de carga.



**Figura 5** Modelo del sistema propuesto

*Fuente: Autor*

### 3.6.2. Arquitectura general del sistema simulado

El sistema está compuesto por tres elementos principales:

#### a) Estación base (eNB/gNB)

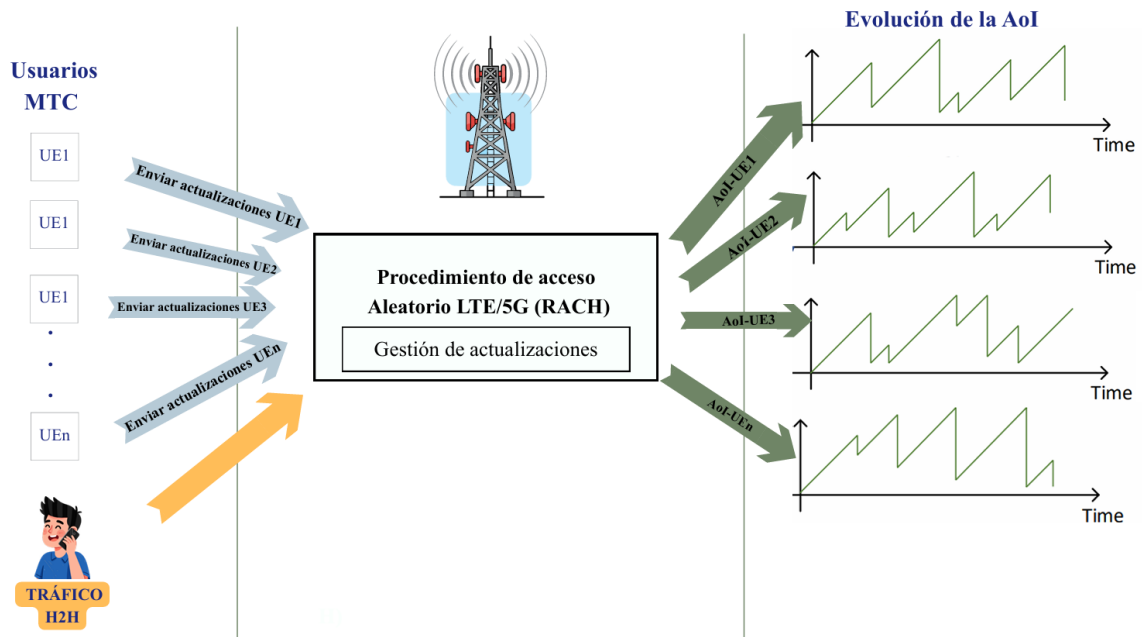
Es la encargada de procesar los intentos de acceso de todos los usuarios, gestionar las respuestas RAR, controlar la resolución de contienda y registrar la información necesaria para el análisis de métricas.

#### b) Usuarios MTC (Máquina a Máquina)

Fueron modelados como dispositivos que generan actualizaciones sincronizadas. Debido a esa sincronización, varios intentos de acceso pueden ocurrir al mismo tiempo.

#### c) Usuarios H2H (Humano a Humano)

Generan tráfico aleatorio de fondo. En una red real, ambos tipos de usuarios comparten el mismo canal RACH, por lo que su coexistencia es necesaria para modelar correctamente la saturación y los patrones de colisión.



**Figura 6** Arquitectura del sistema con tráfico MTC sincronizado y tráfico H2H.

*Fuente: Autor*

### 3.6.3. Generación del tráfico MTC: Escenario $\Phi 1$

El tráfico de los dispositivos IoT se genera utilizando el patrón  $\Phi 1$ , definido como tiempo entre actualizaciones constante con dispositivos sincronizados.

En este escenario:

- todos los dispositivos generan una actualización cada  $T_u$  unidades de tiempo,
- todos comparten un único desfase inicial  $\varphi$ , seleccionado una sola vez,
- lo que provoca transmisiones simultáneas en intervalos regulares.

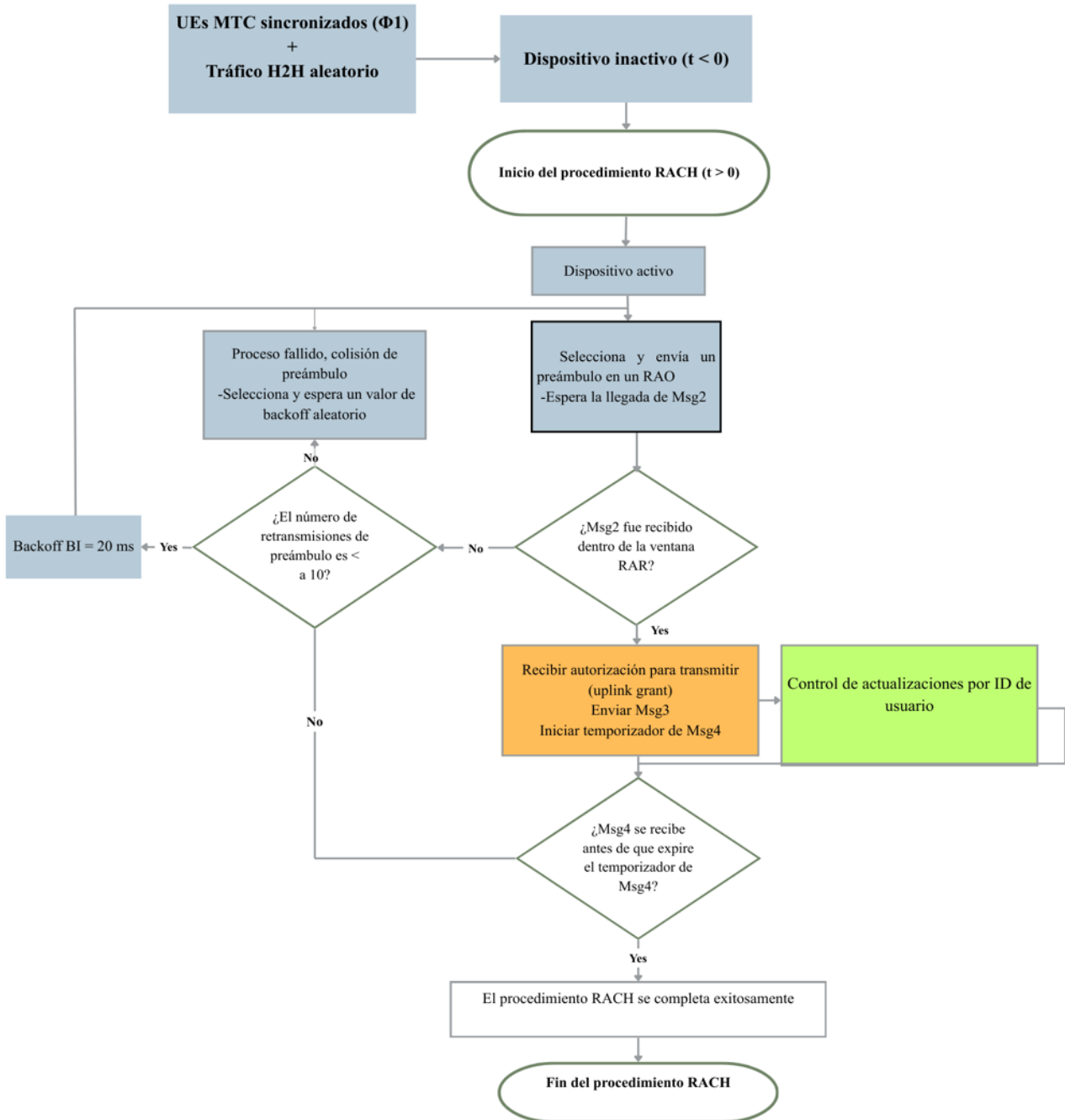
Este comportamiento permite observar el efecto de la sincronización sobre colisiones y retrasos. En la implementación del simulador, el patrón  $\Phi 1$  se trabajó en tiempo discreto, usando RAO de 5 ms. Para evitar coincidencias exactas por cuantización, se aplicó un desfase entre dispositivos y un jitter controlado dentro de cada intervalo, sin perder la sincronización del escenario. El canal RACH fue compartido por tráfico MTC y tráfico H2H aleatorio, permitiendo evaluar la coexistencia de ambos tipos de usuarios.

### 3.6.4. Procedimiento de acceso aleatorio (RACH) implementado

El simulador reproduce el procedimiento de acceso aleatorio basado en contención definido en 3GPP, que consta de cuatro mensajes principales:

- Msg1: Selección de preámbulo y envío.
- Msg2: Random Access Response (RAR).
- Msg3: Solicitud de conexión.
- Msg4: Resolución de contienda.

Durante este proceso pueden ocurrir colisiones, expiración de temporizadores y retransmisiones, lo cual incrementa el retraso de la actualización.



**Figura 7** Diagrama de flujo del procedimiento RACH implementado en el simulador.

*Fuente: Autor*

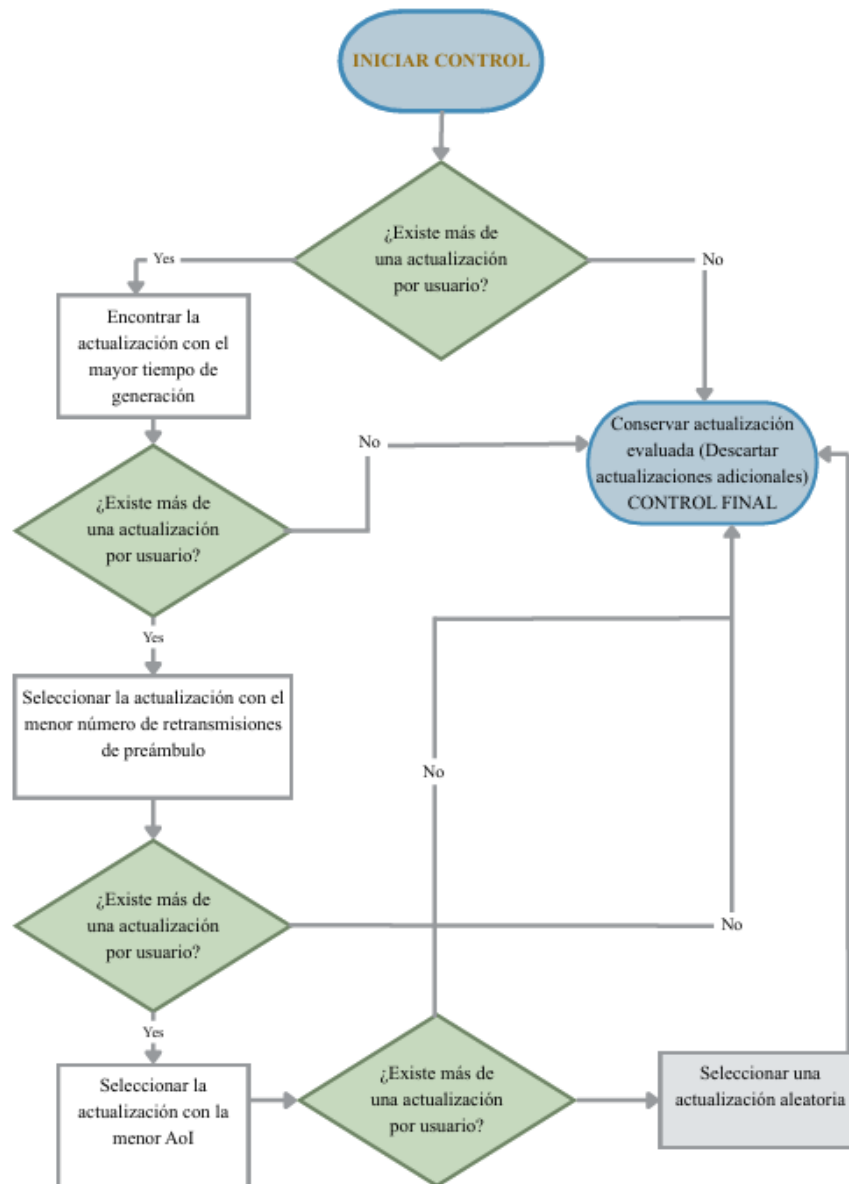
### 3.6.5. Bloque de control de actualizaciones por usuario

Este bloque evalúa cada actualización del usuario según tres criterios:

- se priorizó la actualización más reciente,
- sí hubo empate, se eligió la que tuvo menos retransmisiones,

- si el empate continuó, se priorizó la de menor antigüedad.

Si persiste un empate, se elige una actualización aleatoria.  
 Este mecanismo evita duplicados y garantiza que la BS siempre reciba la información con mayor relevancia.



**Figura 8** Bloque de control de actualizaciones por usuario

*Fuente: Autor*

### 3.6.6. Cómo se registra la AoI en la estación base

Cada vez que un usuario logra completar el procedimiento de acceso, el simulador almacena:

- el tiempo de generación,
- el tiempo de llegada,
- el número de retransmisiones,
- el ID del usuario,

- la antigüedad correspondiente (AoI).

### 3.6.7. Cálculo de métricas por dispositivo

Las dos métricas principales que se utilizarán son:

1. Antigüedad de la Información (AoI) – indica qué tan actualizada llega la información.
2. Probabilidad de transmisión exitosa ( $P_s$ ) – indica qué tan seguido los dispositivos logran completar el acceso sin fallar.

$$AoI(t) = t - u(t) \quad 4$$

donde:

- $t$  = tiempo actual
- $u(t)$  = tiempo en que fue generada la última actualización recibida

La AoI es la diferencia entre el tiempo actual y el instante en que se generó la última actualización recibida.

- AoI promedio:

$$A\bar{o}I = \frac{1}{T} \int_0^T AoI(t) dt \quad 5$$

- AoI pico:

$$AoI_{pico} = \max \{AoI(t)\}. \quad 6$$

- Probabilidad de transmisión exitosa:

$$P_s = \frac{N_{éxitos}}{N_{intentos}} \quad 7$$

- o, en términos de generadas/recibidas,

$$P_s = \frac{N^{rx}}{N^{gen}} \quad 8$$

# CAPÍTULO IV

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Diagrama del procedimiento aplicado en los resultados

En esta figura se muestra el orden en que se presentaron los resultados obtenidos.

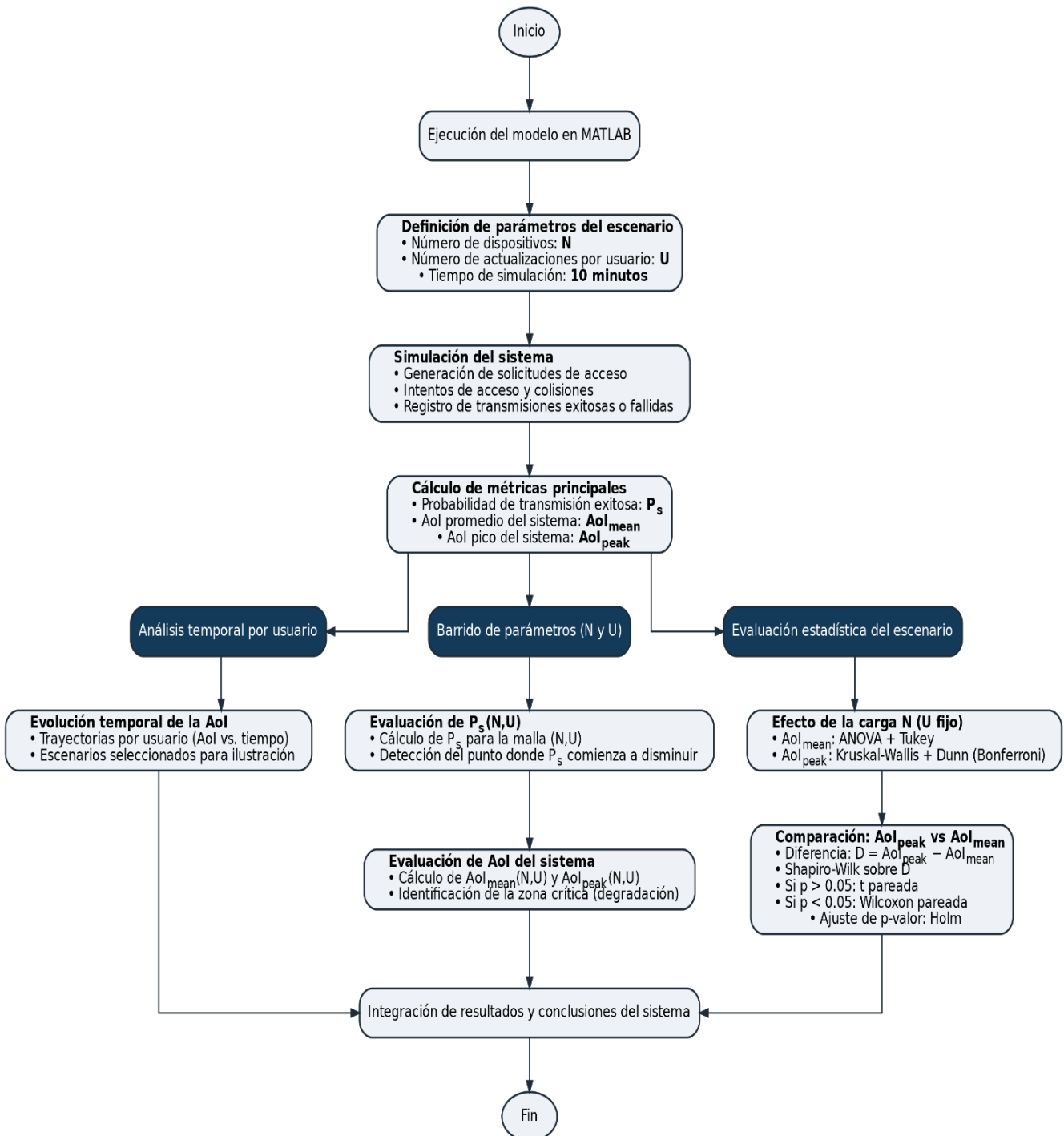
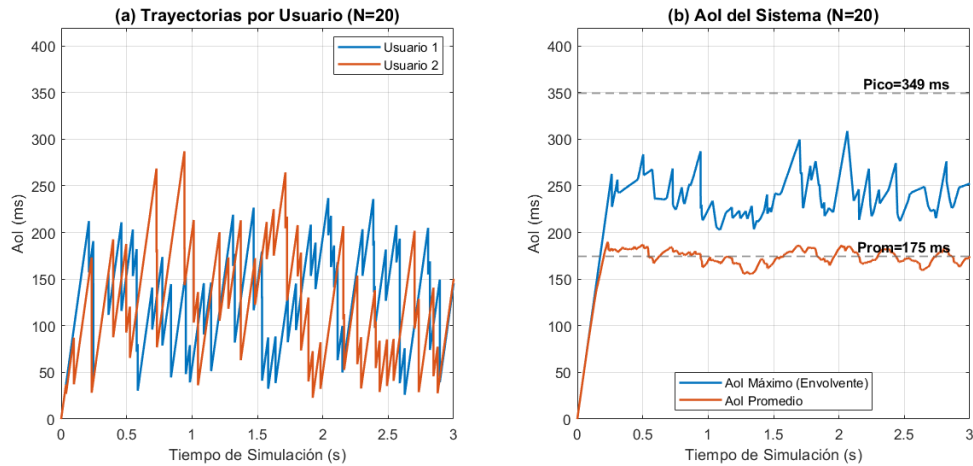


Figura 9 Estructura general del análisis de resultados del sistema.

Fuente: Autor

## 4.2. Resultados del comportamiento temporal del sistema

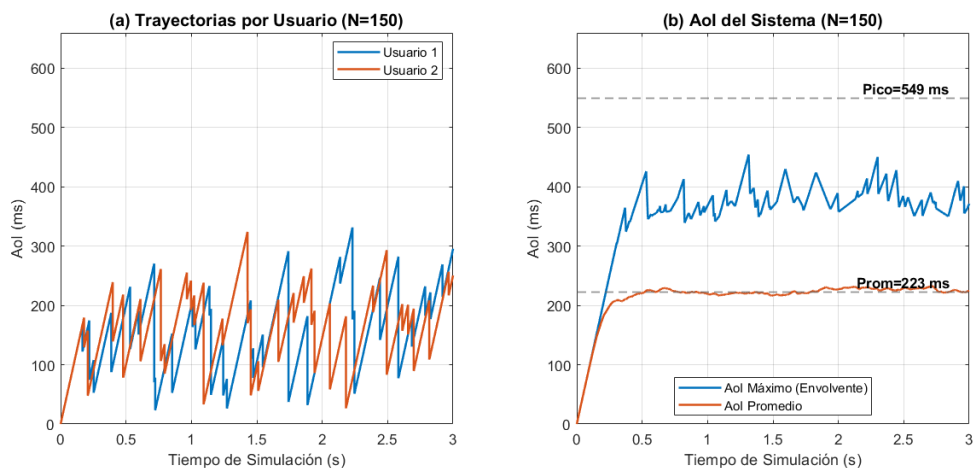
En este análisis se mantuvo fija la tasa de actualizaciones en  $U = 20 \text{ updates/s}$ , y se varió el número de dispositivos  $N$  para observar el comportamiento del sistema. El objetivo fue identificar cómo cambia la AoI cuando aumenta la cantidad de usuarios que compiten por el acceso.



**Figura 10** Antigüedad de la Información AoI para  $N = 20$  y  $U = 20$ : (a) trayectorias por usuario, (b) AoI del sistema

*Fuente: Autor.*

Cuando el número de dispositivos fue bajo ( $N=20$ ), el sistema se mantuvo estable. El AoI promedio del sistema presentó variaciones pequeñas y los picos no alcanzaron valores elevados. Esto indica que el sistema pudo manejar la carga sin deterioro visible



**Figura 11** AoI para  $N = 150$  y  $U = 20$ : (a) trayectorias por usuario, (b) AoI del sistema.

*Fuente: Autor*

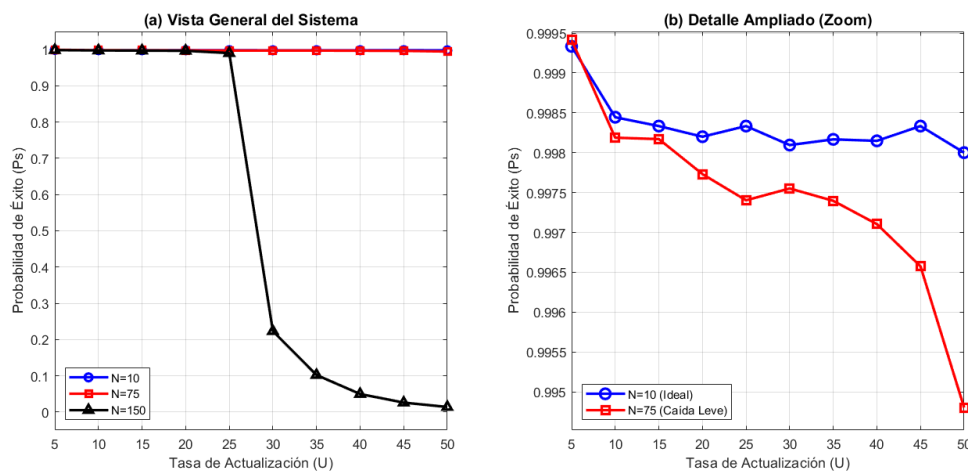
Cuando el número de dispositivos aumentó a  $N=150$ , se observó un cambio evidente en el comportamiento del sistema. El AoI promedio se elevó y los picos crecieron de forma considerable. Esto refleja que el sistema comenzó a saturarse, aun cuando la tasa de actualizaciones se mantuvo constante.

### 4.3. Evaluación del Rendimiento del Sistema

#### 4.3.1. Resultados del análisis del rendimiento del sistema a través de la probabilidad de transmisión

En esta figura se demuestra el cambio de la probabilidad de transmisión exitosa cuando se incrementan los dispositivos y las actualizaciones por usuario. Se incluye una vista de manera general y una ampliación para observar con mayor claridad las variaciones.

En cada escenario se calculó la probabilidad de transmisión exitosa  $P_s$  variando el número de dispositivos  $N$  y la tasa de actualizaciones  $U$ .



**Figura 12** Probabilidad de transmisión exitosa ( $P_s$ ) en función de la tasa de actualización  $U$  para distintos valores de  $N$ . (a) Vista general del sistema. (b) Detalle ampliado de la zona cercana a  $P_s = 1$

**Fuente:** Autor

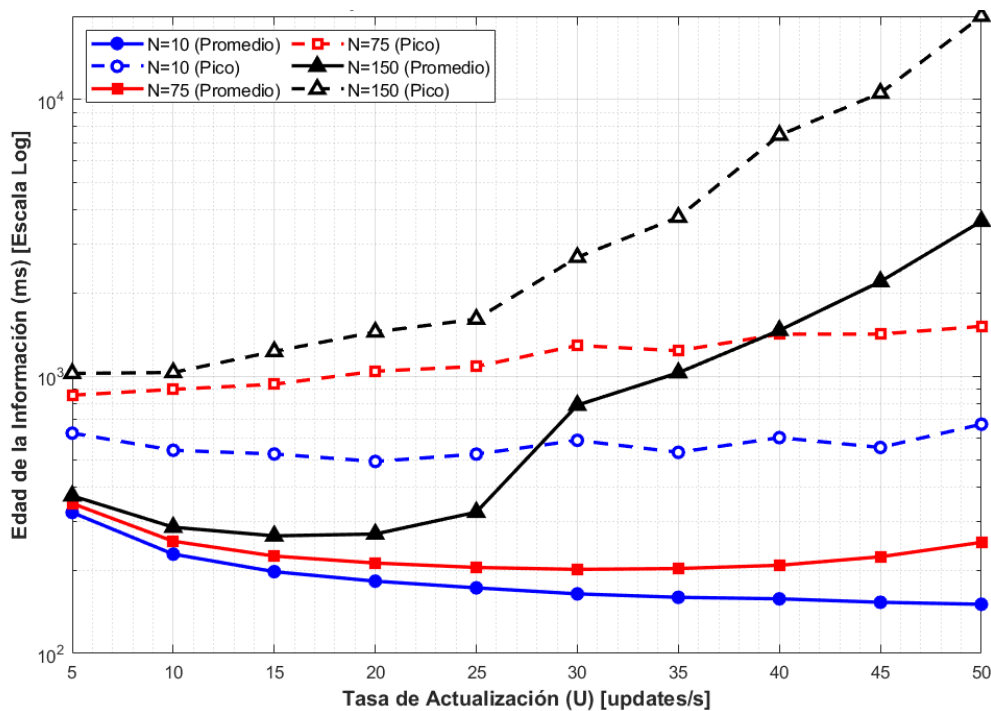
Se evidencia que, con pocos dispositivos, el sistema mantiene un desempeño ideal y estable y cuando el número de dispositivos es elevado, la probabilidad de éxito disminuye de forma significativa al aumentar la tasa de actualización. En  $N = 150$ , la caída de  $P_s$  se observó desde  $U = 25$  y se volvió marcada en  $U = 30$ . Por ello, ese punto fue usado para señalar el comienzo de la pérdida de estabilidad del sistema. La segunda gráfica permite distinguir diferencias, aunque las curvas parecen iguales en la vista general, existen pequeñas variaciones que no se distinguen fácilmente.

### 4.3.2. Resultados de la evaluación de AoI promedio y AoI pico bajo barrido $N$ y $U$

En esta figura se presenta la comparación directa entre el AoI promedio y el AoI pico al variar la tasa de actualización  $U$  para diferentes valores de  $N$ . Se observa que, cuando el número de dispositivos es bajo, ambas métricas se mantienen estables. Sin embargo, al aumentar  $N$ , la diferencia entre el promedio y el pico se hace más evidente.

Para  $N = 150$ , el AoI promedio crece de manera progresiva, mientras que el AoI pico presenta un incremento mucho más pronunciado a partir de  $U = 30$ . Esto indica que, aunque el sistema mantiene cierto comportamiento promedio aceptable, comienzan a presentarse episodios de fuerte desactualización.

La separación entre ambas curvas permite identificar el inicio de la pérdida de estabilidad del sistema.

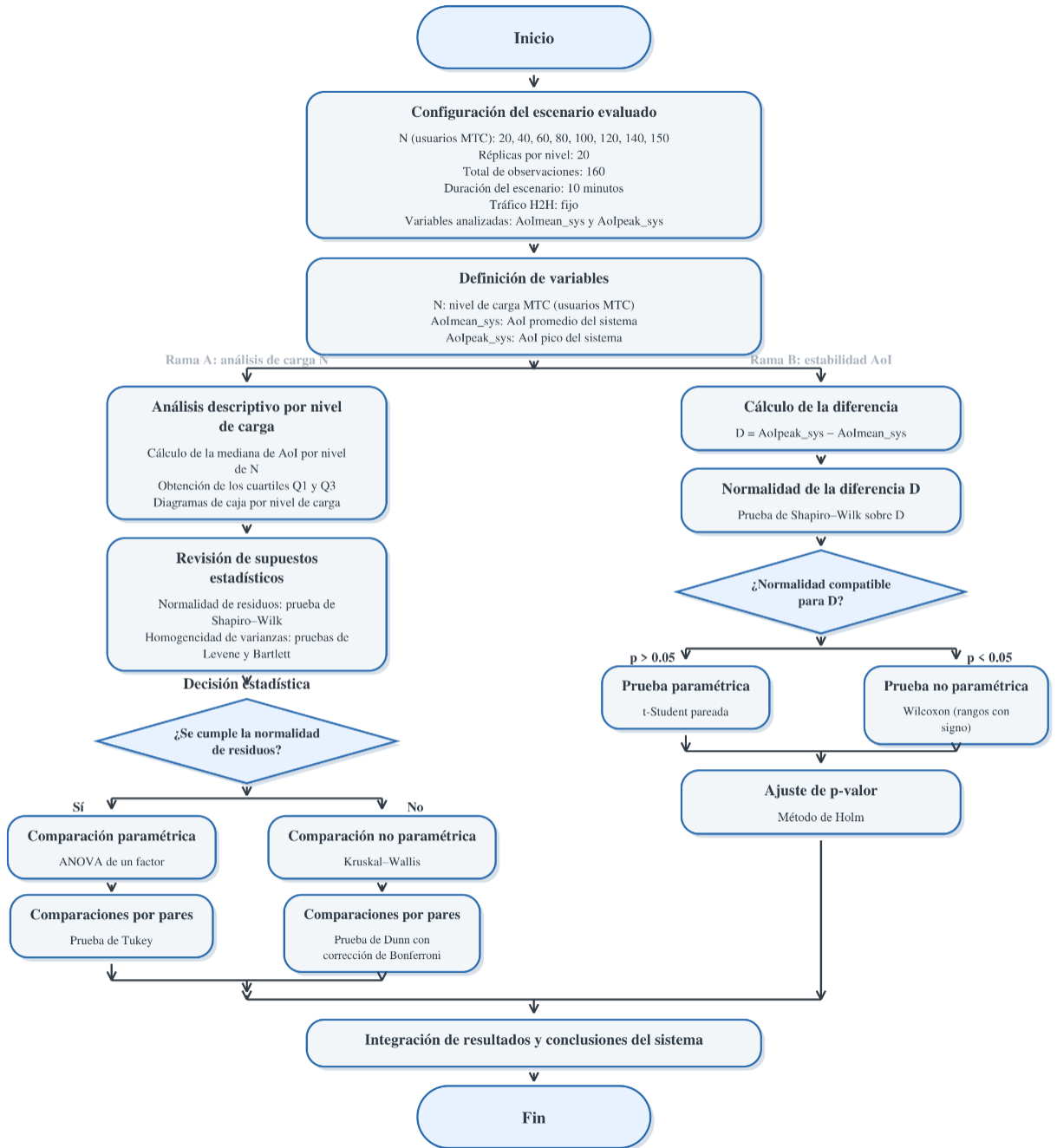


**Figura 13** Comparación entre AoI promedio y AoI pico para distintos valores de  $N$  al variar la tasa de actualización  $U$ .

*Fuente: Autor*

## 4.4. Análisis estadístico del comportamiento de la Antigüedad de la Información

### 4.4.1. Esquema metodológico del análisis estadístico



**Figura 14** Diagrama de flujo del análisis estadístico de la AoI.

*Fuente: Autor*

En esta parte se describió el procedimiento estadístico usado para estudiar el efecto de la carga del sistema, definida por el número de dispositivos  $N$ , sobre la Antigüedad del sistema. Primero se comparó la Antigüedad entre niveles de  $N$  y se revisaron supuestos para seleccionar la prueba apropiada. Luego se calculó la diferencia  $D = AoI_{peak\_sys} - AoI_{mean\_sys}$ , con el propósito de comprobar si el pico fue mayor que el promedio. Con base en  $D$ , se evaluó la normalidad y se aplicó una prueba pareada, incorporando un ajuste de significancia.

#### 4.4.2. Análisis estadístico del comportamiento de la Antigüedad de la Información bajo variaciones de carga

Se analizó un escenario con tiempo de observación fijo de 10 minutos. Se evaluaron ocho niveles de carga definidos por  $N = 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140$  y  $150$  dispositivos MTC. Para cada nivel de  $N$  se realizaron 20 repeticiones, con el fin de que los resultados no dependan de una sola ejecución y se obtenga una lectura más estable del sistema. Además, se consideró tráfico MTC coexistiendo con tráfico H2H, para representar un entorno donde ambos tipos de usuarios solicitan acceso durante el mismo intervalo. En cada ejecución se calcularon dos métricas: AoI promedio del sistema y AoI pico del sistema.

Parámetro / Elemento	Valor	Descripción
Valores de N	20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 150	Representa el número de usuarios (carga) evaluados en el sistema para el análisis de escalabilidad.
Repeticiones por nivel (K)	20	Número de simulaciones independientes ejecutadas por cada nivel de N para garantizar validez estadística.
Tasa de Actualización (U)	20 (updates/s)	Frecuencia con la que cada dispositivo MTC genera nuevos paquetes de información.
Actualizaciones por UE	12,000	Cantidad total de actualizaciones generadas por cada dispositivo durante el tiempo de simulación.
Carga H2H total	3,000	Cantidad total de solicitudes de tráfico humano (H2H) añadidas como carga de fondo para competir por el canal.
Métricas evaluadas	$AoI_{mean\_sys}$ , $AoI_{peak\_sys}$	VARIABLES principales de desempeño: Edad de la Información promedio y pico máximo del sistema.

**Tabla 2** Datos y parámetros del escenario evaluado

**Fuente:** Autor

La Tabla 3 resume los resultados en las 20 repeticiones de cada nivel de  $N$ . Para describir el comportamiento del sistema se reportaron la mediana como medida central y también IQR como medida de dispersión, porque estas medidas se mantienen estables incluso cuando existen valores atípicos o cuando la distribución no es completamente simétrica.

N	K	AoI <sub>mean_med</sub>	AoI <sub>mean_IQR</sub>	AoI <sub>peak_med</sub>	AoI <sub>peak_IQR</sub>
20	20	175	0.200	364	9.70
40	20	180	0.136	398	18.7
60	20	185	0.122	420	22.9
80	20	192	0.0769	453	19.0
100	20	199	0.101	471	18.8
120	20	207	0.151	498	10.7
140	20	217	0.0933	527	20.9
150	20	223	0.0935	555	24.5

**Tabla 3** AoI promedio y AoI pico: mediana e IQR por N

**Fuente:** Autor

En AoI promedio, la mediana aumentó conforme creció N: pasó de 175 ms en N = 20 a 223 ms en N = 150. En AoI pico también se observó un incremento, desde 364 ms en N = 20 hasta 555 ms en N = 150.

En cuanto a la variación entre repeticiones, el IQR del AoI promedio se mantuvo bajo en todos los niveles, lo que mostró que las 20 repeticiones entregaron valores muy cercanos. En AoI pico, el IQR fue mayor, lo que reflejó una mayor variación entre repeticiones.

### Prueba de normalidad y varianzas

Para este análisis se evaluaron N = 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 y 150, con 20 repeticiones por cada nivel, manteniendo fijo U = 20, 1200 actualizaciones por dispositivo y 3000 conexiones H2H. Con esto se obtuvieron 160 observaciones por métrica y con estos resultados, se definió el tipo de prueba más adecuado para AoI promedio y AoI pico.

Métrica	Prueba	Estadístico	p-valor	Lectura
AoI promedio (AoI <sub>mean_sys</sub> )	Shapiro–Wilk (residuos)	W = 0.99385	0.7375	No se rechazó la normalidad
	Levene (mediana)	F = 1.492 (gl = 7,152)	0.1740	No se detectaron diferencias claras de varianza
	Bartlett	K <sup>2</sup> = 12.422 (gl = 7)	0.0875	No se detectaron diferencias claras de varianza

<b>AoI pico (AoIpeak_sys)</b>	Shapiro–Wilk (residuos)	W = 0.94096	0.00000325	Se rechazó la normalidad
	Levene (mediana)	F = 0.9683 (gl = 7,152)	0.4565	No se detectaron diferencias claras de varianza
	Bartlett	K <sup>2</sup> = 11.623 (gl = 7)	0.1137	No se detectaron diferencias claras de varianza

**Tabla 4** Revisión de supuestos del modelo para AoI promedio y AoI pico

**Fuente:** Autor

Para elegir la prueba estadística, primero se revisó la normalidad de los valores obtenidos en las 20 repeticiones de cada nivel de  $N$  para AoI promedio y AoI pico, usando Shapiro–Wilk. Esta prueba se utilizó porque es adecuada cuando el tamaño de muestra por grupo es pequeño o moderado, como aquí con 20 repeticiones, y ayuda a decidir si se puede aplicar un método paramétrico. Luego, para verificar si la variación era similar entre los niveles de  $N$ , se aplicaron Levene y Bartlett: se usó Levene porque es más estable cuando los datos no siguen perfectamente una forma normal, y Bartlett porque es más sensible cuando la normalidad sí se cumple. Con estos resultados se definió el método principal de comparación: ANOVA de un factor para el AoI promedio y Kruskal–Wallis para el AoI pico.

### Diferencias entre niveles de carga $N$

Para verificar si los valores de AoI cambiaron al variar  $N$ , se aplicó una prueba general por métrica. En AoI promedio se utilizó ANOVA de un factor, porque los supuestos evaluados fueron compatibles. En AoI pico se utilizó Kruskal–Wallis, porque los residuos no mostraron un comportamiento compatible con normalidad.

Métrica	Prueba aplicada	Resultado	gl	p-valor	Lectura
AoI promedio	ANOVA de un factor	F = 568538	7	< 2e-16	Se observaron diferencias entre niveles de $N$ .
AoI pico	Kruskal–Wallis	$\chi^2 = 151.08$	7	< 2.2e-16	Se observaron diferencias entre niveles de $N$ .

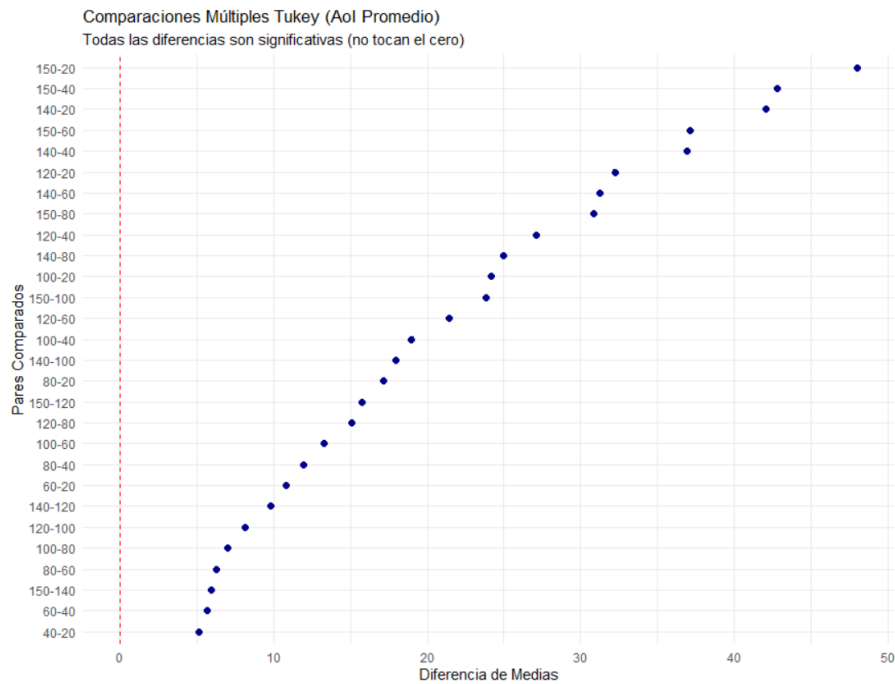
**Tabla 5** Pruebas aplicadas para comparar niveles de  $N$

**Fuente:** Autor

En AoI promedio, el ANOVA entregó  $F = 568538$  con  $p < 2e-16$ , lo que indicó que el AoI promedio no fue igual para todos los niveles de  $N$ . En AoI pico, Kruskal–Wallis entregó  $\chi^2 = 151.08$  con  $p < 2.2e-16$ , lo que indicó que el AoI pico también cambió entre niveles de  $N$ . A continuación, se usaron comparaciones por pares para ubicar entre qué niveles de  $N$  estaban las diferencias.

### Comparaciones por pares entre niveles de N

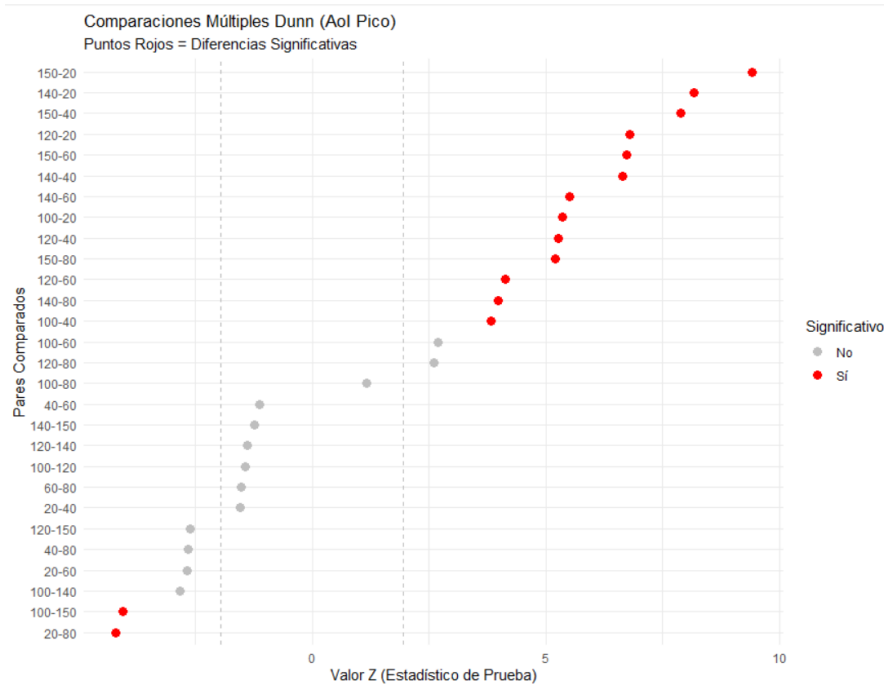
Una vez identificadas diferencias entre niveles de N, se aplicaron comparaciones por pares para ubicar entre qué niveles se presentaron esas diferencias. En AoI promedio se usó el ajuste de Tukey posterior al modelo de un factor. En AoI pico se usó Dunn con corrección de Bonferroni, debido a que los residuos no mostraron una distribución compatible con normalidad. Los resultados detallados pueden consultarse en las tablas incluidas en el Anexo 3 y Anexo 4.



**Figura 15** Diferencias significativas en AoI promedio (Tukey).

**Fuente:** Autor

Al comparar los resultados, se ve que el sistema reacciona de forma muy distinta según lo que estemos midiendo. En el caso del AoI promedio, cada vez que se sube la carga de usuarios N, la actualización de los datos en la red empeora de forma inmediata. Esto se confirma en el gráfico de Tukey, donde se nota que todas las comparaciones están lejos del cero, lo que significa que cualquier aumento de dispositivos afecta el rendimiento promedio.



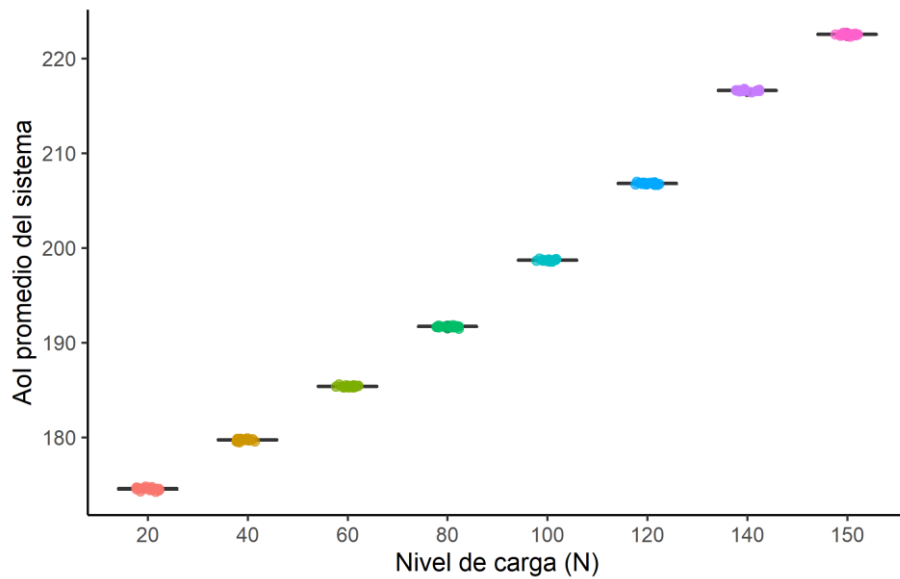
**Figura 16** Diferencias significativas en AoI pico (Dunn).

**Fuente:** Autor

Por otro lado, el AoI pico es un poco más estable cuando los cambios de carga son pequeños. Si miramos los puntos rojos, queda claro la diferencia cuando comparamos los extremos, como pasar de 20 a 150 usuarios. En cambio, los puntos grises muestran que, si los niveles de carga están cerca, los resultados son casi los mismos y no hay un cambio importante. Esto nos indica que los retrasos más altos solo se vuelven un problema serio cuando la red está realmente muy cargada.

**Análisis gráfico del AoI según el nivel de carga**

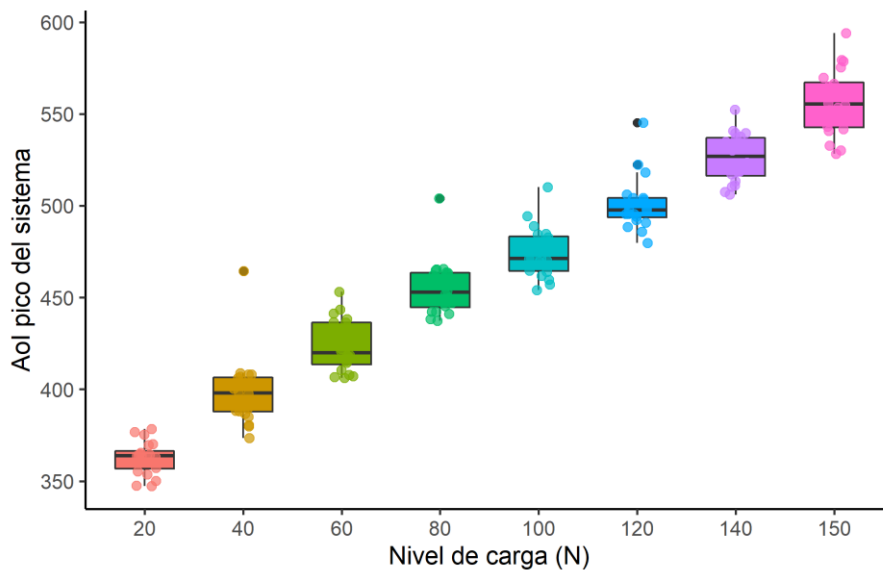
A continuación, se presentan los diagramas de caja del AoI promedio y del AoI pico para cada nivel de carga  $N$ . En cada  $N$ , se incluyeron los resultados de las 20 repeticiones, con el fin de observar cómo cambian las métricas al aumentar la carga y cómo se dispersan los resultados dentro de cada nivel



**Figura 17** Diagrama de caja del AoI promedio del sistema por nivel de carga  $N$

**Fuente:** Autor

En varios niveles, la caja del diagrama se observó como una línea, debido a que los valores del AoI promedio quedaron muy cercanos entre repeticiones. Los puntos corresponden a los resultados obtenidos en cada repetición del mismo nivel de carga, y se incluyeron para mostrar la dispersión entre repeticiones.



**Figura 18** Diagrama de caja del AoI pico del sistema por nivel de carga  $N$

**Fuente:** Autor

En el AoI pico se observaron cajas con mayor altura, lo que indicó una mayor dispersión entre repeticiones. Los puntos representan los resultados de cada repetición y permiten identificar valores alejados dentro de cada nivel de carga.

#### 4.4.3. Análisis comparativo de la Antigüedad promedio y pico

Además de comparar el AoI entre niveles de  $N$ , se evaluó si el AoI pico fue distinto del AoI promedio dentro de cada nivel. Para cada réplica se calculó la diferencia  $D = AoI_{pico} - AoI_{promedio}$ . En cada nivel de  $N$  se obtuvieron 20 valores de  $D$ , uno por réplica.

Para decidir la prueba de comparación, se aplicó Shapiro–Wilk a la distribución de  $D$  en cada nivel de  $N$ . Cuando  $D$  fue compatible con normalidad, se aplicó la prueba  $t$  para muestras pareadas. Cuando no fue compatible, se aplicó Wilcoxon de rangos con signo. Luego se reportó el  $p$ -valor de la comparación entre AoI pico y AoI promedio.

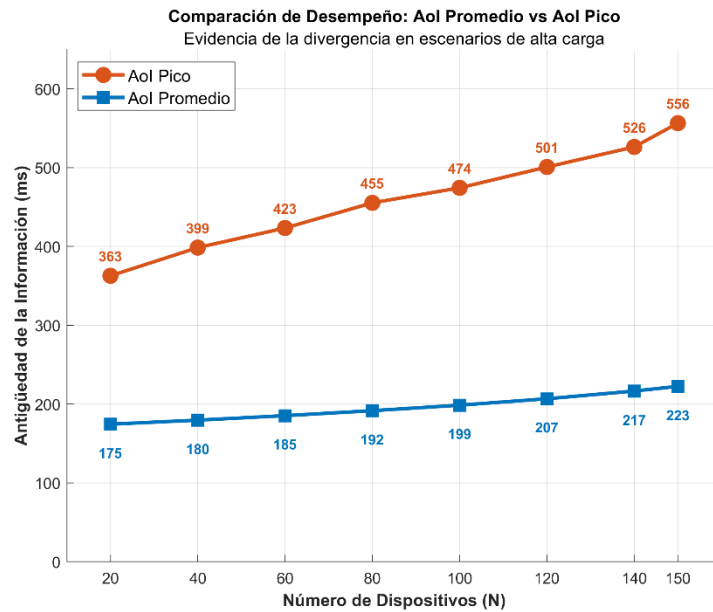
$N$	Réplicas	Media_AoI_Mean	Media_AoI_Peak	P_valor_Shapiro	Test_Aplicado	P_valor_Comparación	Resultado
20	20	174.54	362.80	0.3594	T-Student (Paramétrico)	> 0.001	Diferencia significativa
40	20	179.70	398.55	0.0006	Wilcoxon (No Paramétrico)	< 0.001	Diferencia significativa
60	20	185.38	423.38	0.1415	T-Student (Paramétrico)	< 0.001	Diferencia significativa
80	20	191.68	455.32	0.0031	Wilcoxon (No Paramétrico)	< 0.001	Diferencia significativa
100	20	198.68	474.35	0.3521	T-Student (Paramétrico)	< 0.001	Diferencia significativa
120	20	206.80	500.80	0.0075	Wilcoxon (No Paramétrico)	< 0.001	Diferencia significativa
140	20	216.61	526.24	0.4117	T-Student (Paramétrico)	< 0.001	Diferencia significativa
150	20	222.53	556.42	0.9065	T-Student (Paramétrico)	< 0.001	Diferencia significativa

**Tabla 6** Resultados de la diferencia significativa AoI pico vs AoI promedio según  $N$

**Fuente:** Autor

En todos los niveles de  $N$  se observó una diferencia estadísticamente significativa entre AoI pico y AoI promedio, con  $p < 0.001$ . Esto indicó que el AoI pico fue consistentemente mayor que el AoI promedio en las 20 réplicas de cada nivel.

Se presentó un gráfico de tendencia para comparar visualmente el AoI promedio y el AoI pico a medida que aumentó  $N$ , usando los valores resumidos por nivel.

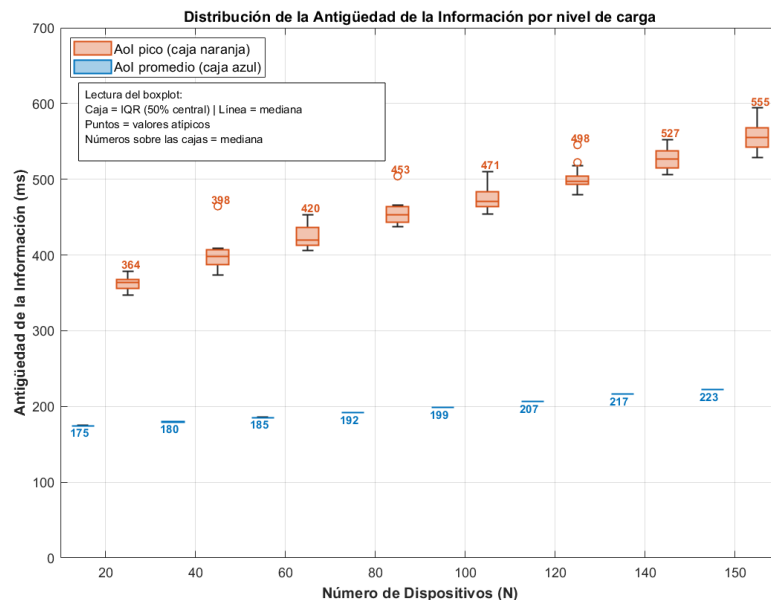


**Figura 19** Tendencia AoI promedio vs AoI pico

*Fuente: Autor*

En todos los niveles de carga, el AoI pico se mantuvo por encima del AoI promedio. Además, la separación entre ambas curvas aumentó con  $N$ , lo que indicó mayor diferencia entre el caso típico y el peor caso bajo cargas altas.

Se presentó un diagrama de caja por nivel de  $N$  para comparar la distribución del AoI promedio y del AoI pico en las 20 réplicas.



**Figura 20** Boxplot comparativo de AoI promedio y pico según el número de dispositivos  $N$

*Fuente: Autor*

El AoI promedio mostró menor dispersión entre réplicas, mientras que el AoI pico presentó mayor variación. Esto respaldó que el pico es más sensible a la congestión, incluso cuando el promedio cambia de forma gradual.

#### 4.4.4. Interpretación de resultados

En el análisis por niveles de carga  $N$ , primero se verificaron las condiciones estadísticas y, con base en ellas, se aplicó ANOVA para el AoI promedio y Kruskal–Wallis para el AoI pico. Los resultados mostraron diferencias significativas entre los distintos niveles de  $N$  en ambas métricas. Esto confirma que, al aumentar el número de dispositivos en la red, la antigüedad de la información también aumenta. El comportamiento creciente se mantiene en todos los escenarios evaluados, evidenciando que la carga del sistema influye directamente en el desempeño temporal de la red.

En el segundo análisis, donde se comparó directamente el AoI pico frente al AoI promedio dentro de cada nivel de  $N$ , se aplicó una prueba pareada (t-Student o Wilcoxon según la normalidad de las diferencias). En todos los casos se obtuvo significancia estadística, lo que indica que el AoI pico es consistentemente mayor que el AoI promedio. Esto demuestra que el sistema no solo presenta un aumento general en la AoI cuando la carga crece, sino que también mantiene una diferencia clara entre el comportamiento promedio y los valores máximos alcanzados en cada escenario.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- Se concluye que el modelo de simulación propuesto permitió representar el comportamiento de una red celular IoT en un entorno sincronizado, incorporando la coexistencia de tráfico MTC y H2H. Su aplicación en dos escenarios con variación controlada de  $N$  y  $U$  evidenció que el mismo modelo puede adaptarse a distintas condiciones de carga sin perder coherencia en los resultados.
- Se determinó la AoI como una medida que permite ver cuánto tiempo pasa desde que una actualización se genera hasta que llega al receptor. Con esta métrica se observó que los retrasos aumentaron cuando más dispositivos intentaron enviar al mismo tiempo, porque el canal no permite que todos entren a la vez y deben esperar o volver a intentar. Además, se calculó la probabilidad de transmisión exitosa ( $P_s$ ) para indicar de manera directa, cuántos intentos lograron completarse frente al total de intentos realizados. Con ello fue posible relacionar los atrasos observados con la facilidad o dificultad que tuvo la red para permitir que las actualizaciones llegaran correctamente. En los escenarios evaluados,  $P_s$  se mantuvo alta, lo que mostró que la mayoría de los intentos sí logró completarse, pero aun así se presentaron atrasos crecientes cuando aumentó la carga, lo que evidenció que una alta tasa de éxito no evita que se acumulen esperas y se eleve la antigüedad de la información. Así, la AoI mostró el atraso con el que llegó la información y  $P_s$  mostró con qué frecuencia se lograron completar las transmisiones bajo las mismas condiciones del escenario.
- Se evaluó el rendimiento del sistema bajo el escenario configurado en la simulación, considerando el número de dispositivos, la tasa de actualización y la coexistencia de tráfico MTC con tráfico H2H dentro del mismo acceso al canal. A medida que se incrementó la carga, se observó que las actualizaciones tardaron más en llegar y que la AoI aumentó. Este comportamiento se reflejó en la AoI promedio y también en la AoI pico. La AoI pico se mantuvo por encima de la AoI promedio y mostró los momentos más críticos, cuando algunas actualizaciones llegaron mucho más tarde que la mayoría. Por esta razón, no es suficiente describir el sistema con un solo valor típico, porque ese valor resume lo que pasa en general y puede ocultar los casos más tardíos, que son los que marcan el peor desempeño. En consecuencia, se identificaron condiciones donde el sistema se mantuvo más estable y otras donde aparecieron atrasos mucho mayores, lo que permitió describir con mayor claridad hasta qué punto la red puede sostener entregas oportunas cuando los dispositivos están sincronizados y compiten por el mismo canal.

## 5.2. Recomendaciones

- Ajustar la configuración del acceso aleatorio cuando aumente el número de dispositivos o la frecuencia de actualización. Esto debe hacerse porque, al incrementarse la demanda sobre el canal, disminuye la probabilidad de transmisión exitosa y se elevan los valores de AoI, en especial el AoI pico. Por ello, antes de ejecutar escenarios con mayor carga, se recomienda definir una configuración del acceso que mantenga un nivel estable de éxitos de transmisión y reduzca acumulación de retrasos.
- Evaluar siempre el AoI promedio junto con el AoI pico al presentar resultados. Esto se recomienda porque el AoI promedio describe el comportamiento típico, pero el AoI pico refleja los casos más críticos, que son los que muestran cuándo el sistema empieza a presentar retrasos fuertes. De esta forma, se evita interpretar como “estable” un escenario que, aunque tenga un promedio moderado, presenta picos altos que afectan la confiabilidad.
- Se recomienda usar el AoI pico como una señal de alerta cuando el canal de acceso empieza a saturarse en un escenario con coexistencia MTC/H2H. Cuando el AoI pico supere un umbral definido, se sugiere bajar por un momento la cantidad de intentos de acceso al mismo tiempo, dando prioridad a los dispositivos MTC que envían información periódica, y limitando más los intentos asociados al tráfico H2H. Con esto se busca reducir la congestión y evitar que la información llegue con un retraso excesivo al sistema.

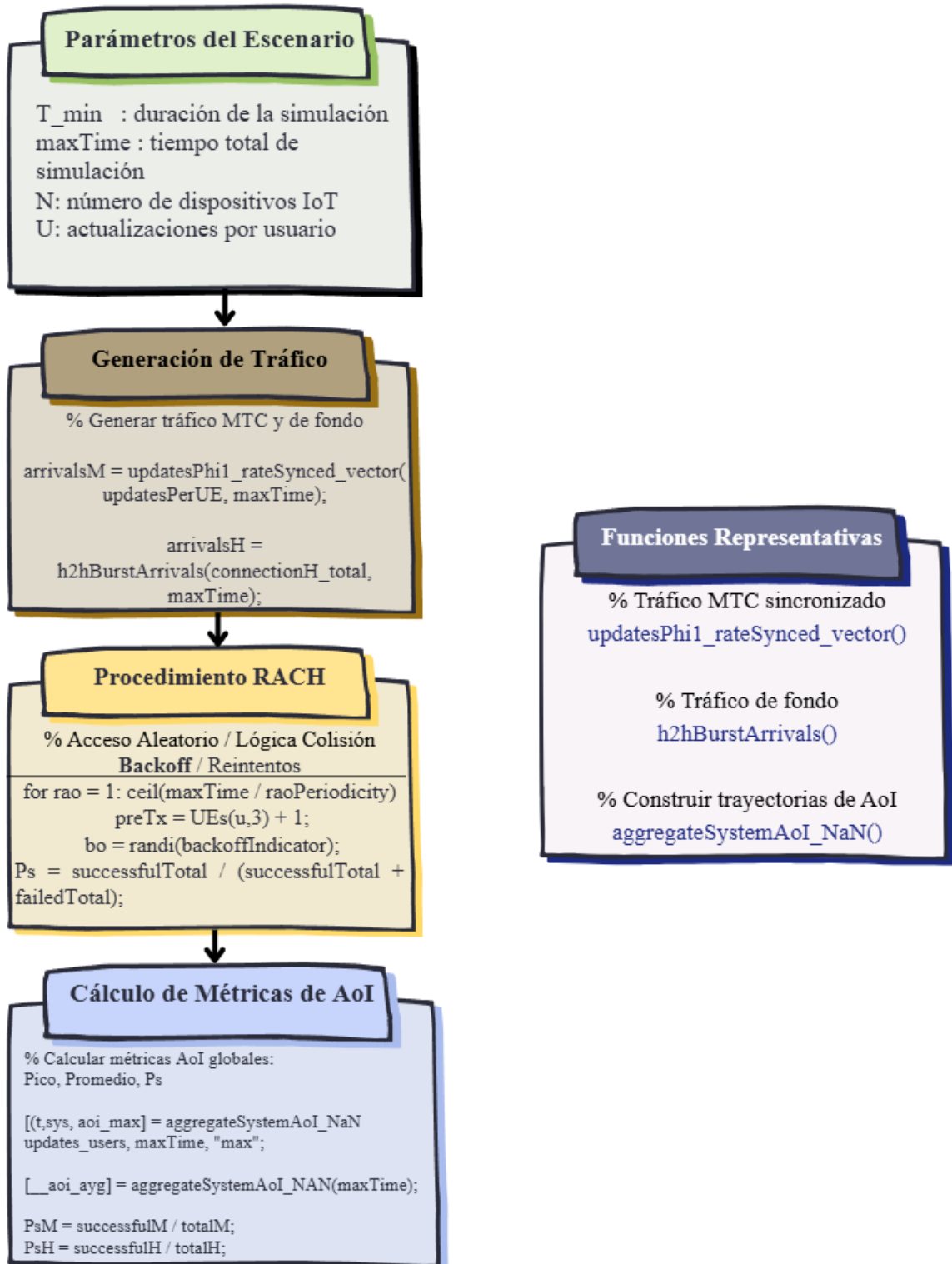
## BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Kaul, R. Yates, and M. Gruteser, “Real-Time Status: How Often Should One Update?,” 2012.
- [2] A. Katherine, G. Morocho, : Vicent, and P. Boscà, “Evaluación de escenarios de comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC) desde la perspectiva de la Antigüedad de la Información (AoI),” 2020.
- [3] H. F. Casanova Rivera, “Diseño de un mecanismo de generación de actualizaciones dinámico utilizando aprendizaje reforzado en comunicaciones IoT celular para optimizar la frescura de la información.,” Riobamba, 2022.
- [4] Y. Zhu, Y. Zhu, A. Gong, Y. Lin, and Y. Zhang, “Age-of-Information Dependent Random Access for Periodic Updating,” Jul. 2023, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2307.02801>
- [5] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), “Study on RAN Improvements for Machine-type Communications (Release 11),” 3GPP, 2011. [Online]. Available: [https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/37\\_series/37.868/37868-110.pdf](https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/37_series/37.868/37868-110.pdf)
- [6] X. Lin, “A Tale of Two Mobile Generations: 5G-Advanced and 6G in 3GPP Release 20,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 62, no. 2, pp. 10–17, 2024, doi: 10.1109/MCOM.001.2300343.
- [7] S. Moises and S. Minchalo, “Diseño y análisis del canal de acceso aleatorio en redes IoT celular para compensar la antigüedad de la información en escenarios de comunicaciones masivas,” ESPOL, Guayaquil, 2021.
- [8] L. Tello-Oquendo *et al.*, “Performance analysis and optimal access class barring parameter configuration in LTE-A networks with massive M2M traffic,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 4, pp. 3505–3520, 2018, doi: 10.1109/TVT.2017.2778278.
- [9] Q. Abbas, S. A. Hassan, H. K. Qureshi, K. Dev, and H. Jung, “A comprehensive survey on age of information in massive IoT networks,” *Comput. Commun.*, vol. 197, pp. 199–213, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2022.10.018>.
- [10] E. Zbankova, A. Khakimov, E. Markova, and Y. Gaidamaka, “The age of information in wireless cellular systems: Gaps, open problems and research challenges,” *Sensors*, vol. 23, no. 19, p. 8238, 2023, doi: 10.3390/s23198238.
- [11] H. Chen, Y. Gu, and S.-C. Liew, “Age-of-Information Dependent Random Access for Massive IoT Networks,” Jan. 2020, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2001.04780>
- [12] D. Zbankova, H. Yanikomeroglu, S. Ulukus, J. M. Jędrzyński, and M. Di Renzo, “Age of Information in Wireless Cellular Networks: State-of-the-Art and Research Challenges,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 4, pp. 361–393, 2023, doi: 10.1109/OJCOMS.2023.3242832.
- [13] M. Mohammadkarimi, O. A. Dobre, and M. Z. Win, “Massive Uncoordinated Multiple Access for Beyond 5G,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 21, no. 5, pp. 2969–2986, May 2022, doi: 10.1109/TWC.2021.3117256.

- [14] J. A. Guerra Barba, “Diseño de una red basada en tecnología de radio de ultra baja potencia para comunicaciones fiables en IoT,” Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2022.
- [15] K. A. Guadalupe Chafra, “Análisis del proceso rampa de potencia en sistemas inalámbricos de cuarta generación (4G) en comunicación masiva IoT para incrementar la probabilidad de acceso satisfactorio,” Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2023.
- [16] A. Kosta, N. Pappas, and V. Angelakis, “Age of information: A new concept, metric, and tool,” *Foundations and Trends in Networking*, vol. 12, no. 3, pp. 162–259, 2017, doi: 10.1561/13000000060.
- [17] L. Liu, K. Li, P. Du, F. Jiang, X. Zhang, and Q. Han, “Age of Information in NOMA-IoT Networks: A Temporal Queuing Model Perspective,” *Mathematics*, vol. 12, no. 10, May 2024, doi: 10.3390/math12101440.
- [18] P. I. Satán, “Análisis del rendimiento del canal de acceso aleatorio en la tecnología Narrowband IoT (NB-IoT) para la comunicación máquina a máquina (M2M),” Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH), Riobamba, Ecuador, 2020.
- [19] A. Kosta, N. Pappas, and V. Angelakis, “Age of Information: A New Concept, Metric, and Tool,” *Foundations and Trends in Networking*, vol. 12, no. 3, pp. 162–259, 2017, doi: 10.1561/13000000057.
- [20] D. Evans, “Internet de las cosas: Cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo,” 2021. [Online]. Available: [https://www.cisco.com/c/dam/en\\_us/about/ac79/docs/innov/IoT\\_IBSG\\_0411\\_FINAL.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411_FINAL.pdf)
- [21] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), “Release 19 Overview,” 2023. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/release-19/>
- [22] S. I. C. López, “Análisis y diseño de un mecanismo de control de congestión en la tecnología NB-IoT para despliegues de comunicación masiva de Internet de las Cosas,” Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2021.
- [23] J. A. G. Barba, “Analysis of the Age of Information in IoT networks with hybrid multiple access control protocols,” Universitat Politècnica de València, Valencia, España, 2023.
- [24] E. T. Ceran, D. Gündüz, and A. György, “Average Age of Information with Hybrid ARQ under a Resource Constraint,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 18, no. 3, pp. 1900–1913, 2019.
- [25] N. X. G. Connect, “Contention Resolution during RACH,” 2025. [Online]. Available: [https://www.nxgconnect.com/resources/Contention\\_Resolution\\_during\\_RACH.pdf](https://www.nxgconnect.com/resources/Contention_Resolution_during_RACH.pdf)
- [26] A. Shaw, “RACH Explanation,” 2025. [Online]. Available: <https://www.avijitshaw.com/5g/rach-explanation/>
- [27] M. Mohammadkarimi, O. A. Dobre, and M. Z. Win, “Massive Uncoordinated Multiple Access for Beyond 5G,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 70, no. 6, pp. 3812–3829, 2022, doi: 10.1109/TCOMM.2022.3171562.

## ANEXOS

### Anexo 1. Script principal en MATLAB para la simulación MTC/H2H y obtención de AoI



## Anexo 2. Funciones base del simulador LTE-A IoT

### 1) updatesPhil\_rateSynced\_vector (Tráfico MTC sincronizado)

function arrivalsM = updatesPhil\_rateSynced\_vector(numUEs, updatesPerUE, maxTime)

```
% Vector sincronizado estilo Phil:
% - todos comparten instantes "globales" pero cada UE tiene offset/jitter en RAOs.
% - cuantización a 5ms (RAO)
rao = 5; % ms
period_ms = maxTime / updatesPerUE;
base_times = (0:(updatesPerUE-1))' * period_ms;

for ue = 1:numUEs
    ue_offset = rao * mod((ue-1), 4); % 0,5,10,15 ms
    jitter = rao * randi([-1 1], size(base_times)); % -5..+5 ms
    t = base_times + ue_offset + jitter;
    t = max(0, min(maxTime-1, t));
    t = round(t/rao)*rao;
    % evitar duplicados por cuantización
    while numel(unique(t)) < updatesPerUE
        ...
    end
end
```

Genera instantes de actualización MTC usando tiempos base comunes y pequeños desfases (offset) y variaciones (jitter) cuantizados a RAOs de 5 ms, evitando duplicados por la cuantización.

### 2) h2hBurstArrivals (Tráfico H2H: fondo + ráfagas)

function arrivalsH = h2hBurstArrivals(totalH, maxTime)

```
% H2H = base uniforme + ráfagas ligeras
rao = 5;
base_frac = 0.7;
n_base = round(totalH * base_frac);
n_burst = totalH - n_base;

t_base = maxTime * rand(n_base,1);
t_base = round(t_base/rao)*rao;

n_centers = 8;
centers = maxTime * rand(n_centers,1);

for i = 1:n_burst
    c = centers(randi(n_centers));
    t = c + 20*randn(); % 20 ms dispersión
    t = max(0, min(maxTime-1, t));
    t_burst(i) = t;
end

arrivalsH = [t_base; t_burst];
```

Modela el tráfico humano como una mezcla de llegadas uniformes en el tiempo y ráfagas leves alrededor de varios centros, para representar momentos de mayor actividad.

### 3) buildAoITrajectory\_saw\_PLOT (Trayectoria AoI por usuario)

function [t\_aoi, aoi\_t] = buildAoITrajectory\_saw\_PLOT(upd, maxTime)

```
% upd = [GenTime, ArrivalsTime, AoI]
% Devuelve puntos con duplicados en tk para dibujar reset vertical (sierra)
[t_rx, idx] = sort(upd(:,2), 'ascend');
a_rx = upd(idx,3);

for k = 1:numel(t_rx)
    tk = t_rx(k);
    ak = a_rx(k);

    % rampa hasta tk
    t_aoi = [t_aoi; t_last; tk];
    aoi_t = [aoi_t; a_last; a_last + (tk - t_last)];

    % reset vertical (mismo tk, distinto AoI)
    t_aoi = [t_aoi; tk];
    aoi_t = [aoi_t; ak];
end

% extender hasta maxTime
t_aoi = [t_aoi; t_last; maxTime];
aoi_t = [aoi_t; a_last; a_last + (maxTime - t_last)];
```

Construye la curva AoI en forma de diente de sierra: el AoI aumenta con el tiempo hasta que llega una actualización y en ese instante se reinicia al valor asociado a esa actualización.

#### 4) aggregateSystemAoI (Agregación AoI del sistema)

```
function [t_sys, aoi_sys] = aggregateSystemAoI(updates_users, maxTime, mode)
```

```
% Agrega AoI del sistema en puntos de quiebre comunes e interpola
t_breaks = [0; maxTime];

for ue = 1:numUEs
    [t, a] = buildAoITrajectory_saw_PLOT(upd, maxTime);
    t_breaks = [t_breaks; t(:)];
end

t_sys = unique(t_breaks);
A(:,ue) = interp(tU, aU, t_sys, 'linear', 'extrap');

switch lower(mode)
    case 'max'
        aoi_sys = max(A, [], 2, 'omitnan');
    case 'avg'
        aoi_sys = mean(A, 2, 'omitnan');
end
```

Une las trayectorias de todos los usuarios en una misma línea de tiempo (`t_sys`) y calcula el AoI del sistema como envolvente máxima o como promedio espacial, usando interpolación para alinear las curvas.

#### 5) temporalMeanFromTrajectory (Promedio temporal de AoI)

```
function m = temporalMeanFromTrajectory(t, a)
```

```
% Promedio temporal: integral(AoI dt) / T
area = 0;
for i = 1:numel(t)-1
    dt = t(i+1) - t(i);
    area = area + 0.5*(a(i) + a(i+1))*dt;
end
m = area / (t(end) - t(1));
```

Obtiene el AoI promedio en el tiempo integrando el área bajo la curva AoI y dividiéndola para la duración total de la simulación.

Anexo 3. Tabla: *Comparaciones múltiples para AoI promedio entre niveles de N (Tukey)*

**AoI promedio – Tukey – Figura 15**

Comparación	Diferencia (diff)	Límite inferior (lwr)	Límite superior (upr)	p ajustado
40-20	5.159199	5.059295	5.259103	0
60-20	10.832984	10.733080	10.932888	0
80-20	17.130985	17.031081	17.230889	0
100-20	24.137200	24.037296	24.237103	0
120-20	32.254746	32.154842	32.354650	0
140-20	42.070120	41.970216	42.170024	0
150-20	47.987086	47.887182	48.086990	0
60-40	5.673785	5.573881	5.773689	0
80-40	11.971786	11.871882	12.071690	0
100-40	18.978000	18.878096	19.077904	0
120-40	27.095547	26.995643	27.195451	0
140-40	36.910920	36.811016	37.010824	0
150-40	42.827887	42.727983	42.927790	0
80-60	6.298001	6.198097	6.397905	0
100-60	13.304216	13.204312	13.404120	0
120-60	21.421762	21.321858	21.521666	0
140-60	31.237136	31.137232	31.337040	0
150-60	37.154102	37.054198	37.254006	0
100-80	7.006214	6.906310	7.106118	0
120-80	15.123761	15.023857	15.223665	0
140-80	24.939135	24.839231	25.039039	0
150-80	30.856101	30.756197	30.956005	0
120-100	8.117547	8.017643	8.217451	0
140-100	17.932920	17.833016	18.032824	0
150-100	23.849886	23.749982	23.949790	0
140-120	9.815373	9.715469	9.915277	0
150-120	15.732340	15.632436	15.832244	0
150-140	5.916966	5.817062	6.016870	0

Anexo 4. Tabla: Comparaciones por pares para AoI pico entre niveles de N (Dunn con ajuste Bonferroni)

AoI pico – Dunn (Bonferroni) – Figura 16

Comparación	Z	p sin ajustar	p ajustado
100-120	-1.443537	0.1488691	1.0000000
100-140	-2.818823	0.004820015	0.1349604
120-140	-1.375285	0.1690431	1.0000000
100-150	-4.057603	0.00004957895	0.001388211
120-150	-2.614066	0.008947188	0.2505213
140-150	-1.238780	0.2154268	1.0000000
100-20	5.354398	0.00000008584178	0.00000240357
120-20	6.797935	0.0000000001061290	0.000000002971613
140-20	8.173221	0.000000000003002645	0.00000000008407405
150-20	9.412001	0.0000000000000004867806	0.000000001362986
100-40	3.818720	0.0001341461	0.003756090
120-40	5.262257	0.0000001422975	0.000003984330
140-40	6.637542	0.00000000003189564	0.000000008930779
150-40	7.876323	0.000000000000003371567	0.000000000009440388
20-40	-1.535678	0.1246173	1.0000000
100-60	2.685730	0.007237144	0.2026400
120-60	4.129268	0.00003639200	0.001018976
140-60	5.504553	0.00000003701059	0.000001036297
150-60	6.743333	0.0000000001547934	0.000000004334214
20-60	-2.668667	0.007615282	0.2132279
40-60	-1.132989	0.2572188	1.0000000
100-80	1.156878	0.2473224	1.0000000
120-80	2.600415	0.009311107	0.2607110
140-80	3.975700	0.00007017249	0.001964830
150-80	5.214481	0.0000001843330	0.000005161325
20-80	-4.197520	0.00002698534	0.0007555896
40-80	-2.661842	0.007771431	0.2176001
60-80	-1.528853	0.1263009	1.0000000