

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

Diseño y análisis del canal de acceso aleatorio en redes IoT Celular para  
compensar la antigüedad de la información en escenarios de  
comunicaciones masivas

**PROYECTO DE TITULACIÓN**

Previo la obtención del Título de:

**Magister en Telecomunicaciones**

Presentado por:

Samuel Moises Sinche Minchalo

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto lo dedico al único y sabio DIOS nuestro salvador, sea la gloria y majestad, imperio y potencia ahora y por todos los siglos. Amén.

A mi esposa por haberme apoyado en todo momento, a mis hijas porque son un regalo maravilloso de DIOS.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'S. Sinche', enclosed within a large, loopy circular flourish.

**Samuel Sinche**

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi más sincero agradecimiento a DIOS por dame la vida, guiarme en cada momento y darme la salud para poder elaborar el presente trabajo.

Al Ph.D. Luis Tello Oquendo, por su apoyo incondicional como tutor en todo el desarrollo del presente trabajo.

A los docentes y administrativos de la FIEC, por mostrar el camino en el maravilloso mundo de las telecomunicaciones.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación me corresponden conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución, Ing. Samuel Moises Sinche Minchalo, y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”.



---

Autor

## **COMITÉ EVALUADOR**

**Ing. Luis Tello Oquendo, Ph.D.**

PROFESOR TUTOR

**Ph.D. José Córdova García**

PROFESOR EVALUADOR

## RESUMEN

Cuando se contempla el progreso de las telecomunicaciones, resulta evidente que más dispositivos se adhieran a la red celular, adicionando paradigmas que requieren interconexión ubicua como la Internet de las Cosas (*Internet of Things*, IoT). Consecuentemente, las comunicaciones masivas demandan nuevas formas de medir el rendimiento de la red, ya que las métricas tradicionales no pueden caracterizar adecuadamente los valores de estado de un sistema en aspectos como la puntualidad de entrega de actualizaciones, que es fundamental en aplicaciones como los sistemas de misión crítica. Es por ello por lo que se diseña y analiza el canal de acceso aleatorio en redes IoT celular, mediante la evaluación de una nueva métrica denominada antigüedad de la información (*Age of Information*, Aol). Esta métrica permite determinar si la última actualización recibida en una entidad que agrega y procesa estos datos se considera obsoleta debido a la existencia de una actualización más reciente. El modelo del sistema consta de una estación base que atiende a varios dispositivos IoT que solicitan una conexión y envían actualizaciones de una aplicación. Para evaluar el desempeño de la red se establecieron diversos patrones de generación de actualizaciones para los dispositivos, de modo que el escenario de simulación sea próximo a la realidad. Se presenta la optimización de la métrica Aol en un punto de saturación que se utiliza como indicador para conocer el momento en el que incrementar el número de actualizaciones repercutirá negativamente al sistema produciéndose información obsoleta.

**Palabras Clave:** Métrica Aol, IoT, random Access channel, optimización.

## **ABSTRACT**

*When the progress of telecommunications is contemplated, it is evident that more devices adhere to the cellular network, adding paradigms that require ubiquitous interconnection, such as the Internet of Things (IoT). Consequently, massive communications demand new ways of measuring the network performance since traditional metrics cannot adequately characterize the system's state values in aspects such as the timeliness of updates delivery, which is essential in applications such as mission-critical systems. That is why the random access channel in cellular IoT networks is designed and analyzed by evaluating a new metric called the age of information (Age of Information, AoI). This metric allows determining if the last update received in an entity that aggregates and processes this data is considered obsolete due to the existence of a more recent update. The system model consists of a base station that serves numerous IoT devices requesting a connection and sending application updates. Several patterns of updates generation were established to evaluate the network's performance so that the simulation scenario is close to reality. The optimization of the AoI metric is presented in a saturation point used as an indicator to know when increasing the number of updates will negatively affect the system, producing obsolete information.*

**Keywords:** *AoI metric, IoT, random access channel, optimization.*

# ÍNDICE GENERAL

|  |      |
|--|------|
| COMITÉ EVALUADOR .....   | 5    |
| RESUMEN .....  | I    |
| ABSTRACT .....   | II   |
| ÍNDICE GENERAL .....   | III  |
| ABREVIATURAS.....  | V    |
| SIMBOLOGÍA.....  | VI   |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....  | VII  |
| ÍNDICE DE TABLAS.....  | VIII |
| CAPÍTULO 1 .....   | 1    |
| 1. Introducción.....   | 1    |
| 1.1 Descripción del problema.....  | 1    |
| 1.2 Justificación del problema.....  | 2    |
| 1.3 Objetivos .....  | 3    |
| 1.3.1 Objetivo General.....  | 3    |
| 1.3.2 Objetivos Específicos .....  | 3    |
| 1.4 Marco teórico .....  | 3    |
| 1.4.1 Redes celulares de nueva generación.....                                       | 3    |
| 1.4.2 Procedimiento de acceso aleatorio .....  | 4    |
| 1.4.3 Antigüedad de la Información ( <i>Age of Information, Aol</i> ) .....          | 8    |
| CAPÍTULO 2 .....   | 12   |
| 2. Metodología .....   | 12   |
| 2.1 Modelo del sistema y parámetros de configuración .....                           | 12   |
| 2.2 Patrones de generación de actualizaciones por dispositivos IoT .....             | 13   |
| 2.3 Control de actualizaciones y registro de la métrica Aol en la estación base..... | 16   |

|   |    |
|---|----|
| 2.4 Función de coste para evaluar el sistema considerando la métrica Aol, el número de actualizaciones que generan los dispositivos y el número de retransmisiones utilizados por estos ..... | 18 |
| CAPÍTULO 3 .....  | 20 |
| 3. Resultados y análisis.....   | 20 |
| 3.1 Efecto de los patrones de generación de actualizaciones en la métrica Aol.....  | 20 |
| 3.1.1 Patrón de generación de actualizaciones exponencial .....   | 20 |
| 3.1.2 Patrón de generación de actualizaciones Uniforme.....   | 22 |
| 3.1.3 Patrón de generación de actualizaciones <i>Phi1</i> .....   | 24 |
| 3.1.4 Patrón de generación de actualizaciones <i>Phi2</i> .....   | 26 |
| 3.2 Análisis de la probabilidad de acceso satisfactorio en función del número de actualizaciones .....  | 29 |
| 3.3 Máximo valor del número de actualizaciones para una determinada carga del sistema.....  | 29 |
| 3.4 Evaluación del sistema con la función de coste considerando la métrica Aol, el número de actualizaciones por dispositivo y el número de retransmisiones de los dispositivos .....         | 31 |
| CAPÍTULO 4 .....  | 36 |
| 4. Conclusiones y recomendaciones.....  | 36 |
| Conclusiones.....   | 37 |
| Recomendaciones.....  | 38 |
| BIBLIOGRAFÍA .....  | 39 |
| APÉNDICES.....  | 42 |

## ABREVIATURAS

|       |  |
|-------|--|
| ESPOL | Escuela Superior Politécnica del Litoral |
| IoT   | Internet of Things                       |
| BS    | Estación base                            |
| MTC   | Machine Type Communication               |
| RA    | Acceso Aleatorio                         |
| H2H   | Human to Human                           |
| M2M   | Machine to Machine                       |
| PRACH | Physical Random Access Channel           |
| CN    | Core Network                             |
| RAN   | Radio Access Network                     |
| IP    | Internet Protocol                        |
| UE    | User Equipment                           |
| PUSCH | Physical Uplink Shared Channel           |
| PRACH | Physical Random Access Channel           |
| RAO   | Random Access Opportunities              |
| RB    | Resource Block                           |
| ZC    | Zadoff–Chu                               |
| RAR   | Random Access Response                   |
| PDSCH | Physical Downlink Shared Channel         |
| WRAR  | Window RAR                               |
| SIB   | System Information Block                 |
| SIB2  | SIB Tipo 2                               |

## SIMBOLOGÍA

|                  |  |
|------------------|--|
| $P_s$            | Probabilidad de acceso satisfactorio         |
| $k$              | Número de transmisiones por usuario          |
| $N$              | Número de usuarios                           |
| $U$              | Actualizaciones                              |
| $T$              | Tiempo de actualización del sistema          |
| $t$              | Tiempo entre actualizaciones                 |
| $i$              | Índice de generación de actualización        |
| $t_i$            | Tiempo en el que se genera una actualización |
| $t'_i$           | Tiempo en el que se recibe la actualización  |
| $A$              | Área   |
| $Q$              | Polígono                                     |
| $\overline{Aol}$ | Media temporal de Aol                        |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 Evolución de estándares 3GPP [7].....   | 4  |
| Figura 1.2 Índices de configuración de PRACH [8] .....   | 5  |
| Figura 1.3 Procedimiento de Acceso Aleatorio RA [13].....  | 6  |
| Figura 1.4 Esquema sobre la diferencia entre enviar paquetes con regularidad y rendimiento [18]..... | 8  |
| Figura 1.5 La evolución de la Aol en el tiempo [1].....  | 11 |
| Figura 2.1 El modelo del sistema. Elaboración Propia .....   | 13 |
| Figura 2.2 Diagrama de flujo del procedimiento de acceso aleatorio. Elaboración Propia .....         | 14 |
| Figura 2.3 Detalle del procedimiento RA en el tiempo [8].....  | 15 |
| Figura 2.4 Diagrama de flujo control de actualizaciones por UE. Elaboración Propia ...               | 17 |
| Figura 3.1 Representación de los datos de la tabla 3.1 .....   | 21 |
| Figura 3.2 Representación de los datos de la tabla 3.2.....  | 22 |
| Figura 3.3 Representación de los datos de la tabla 3.3.....  | 23 |
| Figura 3.4 Representación de los datos de la tabla 3.4.....  | 24 |
| Figura 3.5 Representación de los datos de la tabla 3.5.....  | 25 |
| Figura 3.6 Representación de los datos de la tabla 3.6.....  | 26 |
| Figura 3.7 Representación de los datos de la tabla 3.7.....  | 27 |
| Figura 3.8 Representación de los datos de la tabla 3.8.....  | 28 |
| Figura 3.9 Probabilidad de acceso satisfactorio $P_s$ .....  | 30 |
| Figura 3.10 Máximo valor de $U$ para $P_s > 0,97$ vs. $N$ .....                                      | 30 |
| Figura 3.11 Intentos de retransmisión por usuario vs. actualizaciones .....                          | 32 |
| Figura 3.12 Función de coste con $\alpha=0.2$ y $\beta$ 0.8.....                                     | 33 |
| Figura 3.13 Función de coste con $\alpha=0.5$ y $\beta$ 0.5.....                                     | 34 |
| Figura 3.14 Función de coste con $\alpha=0.8$ y $\beta=0.2$ .....                                    | 35 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 2.1 RACH Configuration [21] .....                                   | 16 |
| Tabla 3.1 Valores máximos de las actualizaciones exponenciales .....      | 21 |
| Tabla 3.2 Valores promedio de las actualizaciones exponenciales .....     | 22 |
| Tabla 3.3 Valores máximos de las actualizaciones uniformes.....           | 23 |
| Tabla 3.4 Valores promedios de las actualizaciones uniformes .....        | 24 |
| Tabla 3.5 Valores máximos de las actualizaciones Phi1 .....               | 25 |
| Tabla 3.6 Valores promedios de las actualizaciones Phi1 .....             | 26 |
| Tabla 3.7 Valores máximos de las actualizaciones Phi2 .....               | 27 |
| Tabla 3.8 Valores promedios de las actualizaciones Phi2.....              | 28 |
| Tabla 3.9 Probabilidad de acceso satisfactorio Ps .....                   | 29 |
| Tabla 3.10 Intentos de retransmisión por usuario vs. actualizaciones..... | 31 |

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

La métrica antigüedad de la información (*Age of Information, Aol*) se ha propuesto recientemente para cuantificar el tiempo transcurrido desde la generación de la última actualización de estado de un dispositivo, recibida en una entidad que agrega y procesa esta información. Siempre que el nodo de destino recibe un nuevo paquete de actualización, la métrica Aol cae al tiempo transcurrido desde el tiempo de generación del paquete recibido, mientras que crece linealmente en caso contrario [1].

### 1.1 Descripción del problema

Las redes de comunicación celular son prometedoras para brindar conectividad y admitir las comunicaciones de Internet de las Cosas (*Internet of Things, IoT*). Sin embargo, el protocolo de acceso aleatorio convencional utilizado en tecnologías como *Long Term Evolution-Advanced* (LTE-A) es ineficaz, ya que fue diseñado para comunicaciones humano a humano (H2H) [2]. Por lo tanto, al presentarse un tráfico elevado por medio de las comunicaciones IoT masivas (sensores que reportan algún evento específico), se genera una situación de sobrecarga que requiere la reevaluación de la gestión eficiente de los recursos de red.

El estándar actual no está optimizado para el tráfico IoT masivo, esto ocasiona que las actualizaciones enviadas por los dispositivos IoT se retrasen y no tengan validez. La información desactualizada puede conducir a una estimación incorrecta del estado de un sistema en particular, desperdicio de recursos y provocar una disminución de rendimiento severa [3]. Cabe destacar que la mayoría de los dispositivos IoT tienen energía limitada. El hecho de retransmitir información aumenta el consumo energético de los dispositivos además de desperdiciar los recursos limitados del canal de acceso aleatorio en la red de acceso radio. Nótese además que la información obsoleta no solo

desperdicia el ancho de banda de la red, sino que también puede tener consecuencias desastrosas para un sistema de misión crítica [4].

## **1.2 Justificación del problema**

Mantener baja la métrica Aol, es el objetivo principal cuando Aol se trata como una herramienta para facilitar la actualización oportuna de información, mejorando eventualmente las métricas de rendimiento tradicionales en diferentes contextos. En particular, las aplicaciones emergentes dependen de la transmisión inalámbrica para difundir información urgente. Por ejemplo, las redes vehiculares pueden intercambiar información sobre la posición y la velocidad del vehículo para habilitar aplicaciones de seguridad en las que transmisión puntual de actualizaciones es esencial [5].

El diseño y análisis del canal de acceso aleatorio para medir la Aol en la red de acceso radio de comunicación celular permite evaluar el efecto del número de actualizaciones que dispositivos IoT generan para reportar un evento. El desarrollo de este proyecto permite evaluar la red y obtener un punto de saturación del canal de acceso aleatorio. Este punto de saturación sirve como indicador para conocer el momento en el que aumentar el número de actualizaciones impactará negativamente al sistema produciéndose información obsoleta.

Por otro lado, se pretende definir una función que permita evaluar el rendimiento del sistema y analizar el impacto de la métrica Aol considerando el consumo energético de los dispositivos IoT al momento de acceder a la red de acceso radio desde el enfoque del número de retransmisiones. Con esto se puede encontrar un balance entre la generación de actualizaciones por un determinado número de dispositivos y la métrica de antigüedad de la información. Esto aseguraría que el rendimiento del sistema no se viese afectado y la información de estado de un determinado sistema sea válida.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Evaluar la antigüedad de la información en escenarios IoT celular de comunicación masiva para optimizar el sistema en función del número de actualizaciones que generan los dispositivos IoT y el número de retransmisiones en el canal de acceso aleatorio.

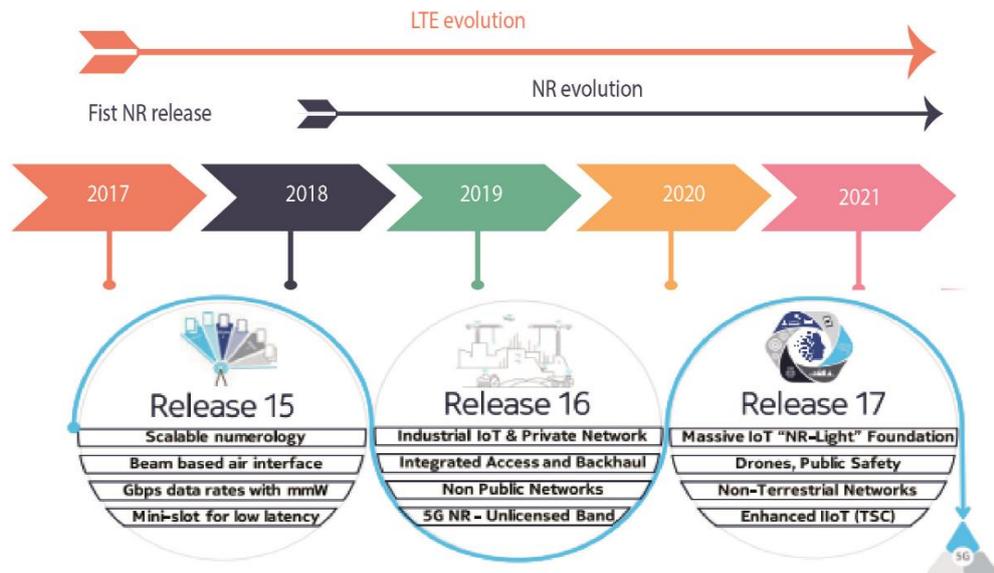
### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Modelar el canal de acceso aleatorio en redes IoT celular de comunicación masiva.
2. Establecer la métrica de antigüedad de la información en la red de acceso radio y evaluarla en escenarios de comunicación masiva.
3. Ajustar la cantidad de actualizaciones de dispositivos IoT y el número de retransmisiones permitidas en la red de acceso radio.
4. Optimizar la métrica antigüedad de la información en función de las variables número de actualizaciones y número de retransmisiones.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Redes celulares de nueva generación**

Los avances de las comunicaciones han permitido el progreso vertiginoso de la humanidad que desde tiempos remotos han sido y continúan siendo hasta nuestros días un medio con el cual se intercambia información, de los cuales han surgido diversas tecnologías que cada vez convergen, aumentando así la interoperabilidad entre tecnologías. En la figura 1.1 se muestra el progreso de los estándares en la línea de tiempo desde 2017 al año actual [6].



**Figura 1.1 Evolución de estándares 3GPP [7]**

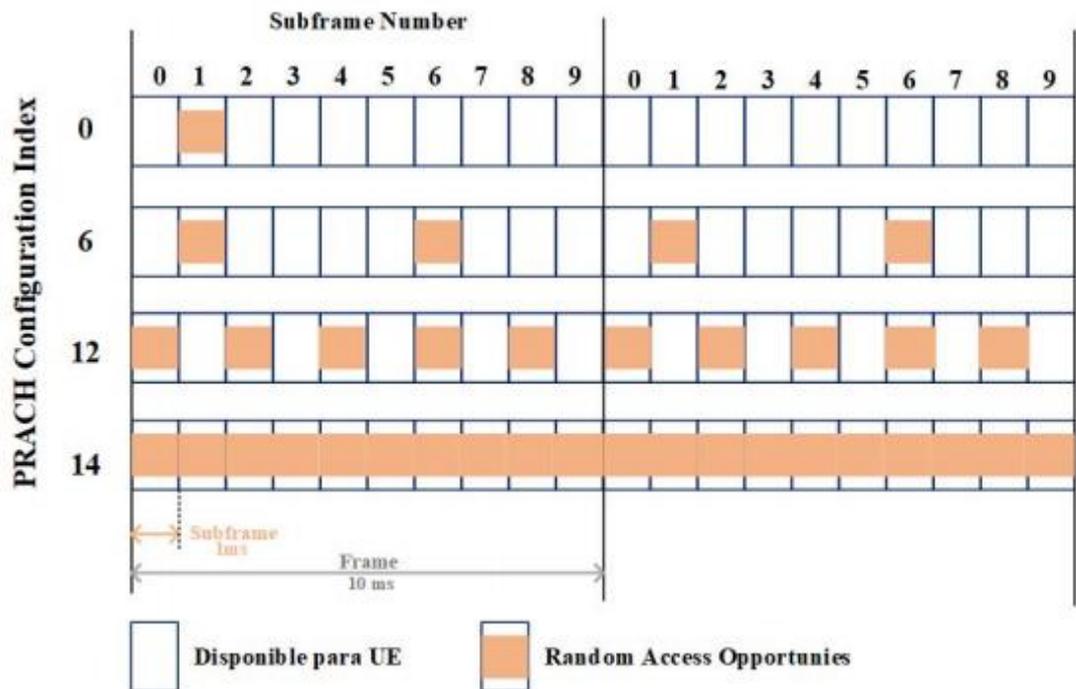
Las redes 4G/ 5G tienen dos partes fundamentales para su funcionamiento, la red central (*Core Network, CN*) y la red de acceso por radio (*Radio Access Network, RAN*). La CN permite el control global de los dispositivos móviles y los flujos de paquetes IP, mientras que la RAN permite la comunicación inalámbrica y el acceso por radio. La RAN proporciona los protocolos de plano de control y también el plano de usuario indispensable para la comunicación de dispositivos 5G; los dispositivos terminales en H2H o MTC se denominan equipo de usuario (UE).

#### **1.4.2 Procedimiento de acceso aleatorio**

El canal físico de control de enlace ascendente (*Physical Uplink Control Channel, PUCCH*), permite la transmisión de los datos juntamente con el canal físico de acceso aleatorio (*Physical Random Access Channel, PRACH*) que interactúa con los mensajes de acceso aleatorio que son transmitidos por el equipo de usuario (UE). Los intentos de acceso aleatorio (*Random Access, RA*) permitidos se realizan utilizando recursos predefinidos en tiempo o frecuencia llamados oportunidades de acceso aleatorio (*Random Access Opportunities, RAOs*), el PRACH se utiliza para

señalizar una solicitud de conexión en el caso de haber UEs que requieran acceder a la red celular [8] [9].

En el dominio de la frecuencia, el PRACH tiene establecido seis bloques de recursos (*Resource Blocks, RBs*), donde cada RA slot ocupa 1.08MHz, que corresponde a 6 bloques por 180 KHz; en el dominio del tiempo la duración depende del formato de solicitudes de acceso. La periodicidad de los RAOs depende de la configuración del RACH a través del Prach-Config Index en la estación base (*Base Station, BS*), lo cual permite que los RAOs sean configurables y su periodicidad pueda fluctuar de un RAO a otro por 20 ms, es decir en cada dos tramas o un RAO cada 1 ms, por consiguiente, cada subtrama. En la figura 1.2, se muestra el proceso de mapeo de las subtramas en el canal de enlace ascendente.

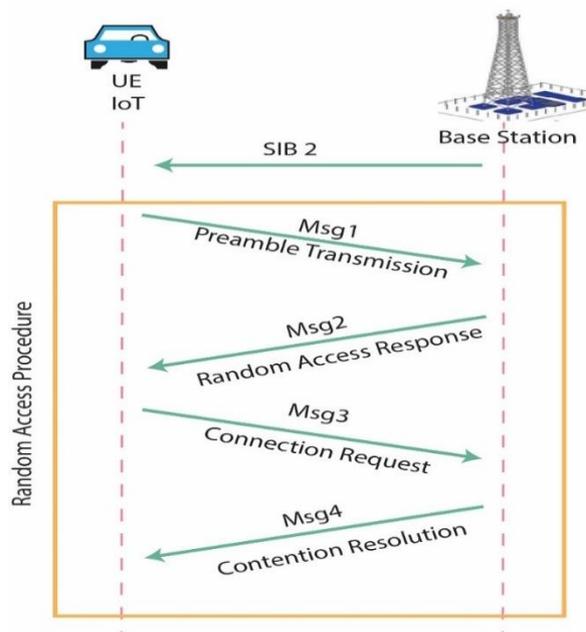


**Figura 1.2 Índices de configuración de PRACH [8]**

El proceso de acceso aleatorio basado en contención se establece mediante un protocolo de enlace de cuatro mensajes, iniciado por el

dispositivo MTC (UE), dichos mensajes se muestran en la figura 1.3, los cuales deben completarse con éxito para que la BS entregue los recursos y comience la transmisión.

**Msg1: RACH Preamble.** El UE inicia la conexión enviando una secuencia conocida como preámbulo de acceso aleatorio Msg1 a la BS, mediante el PRACH; el UE elige esta secuencia aleatoriamente de un total de 54 secuencias de preámbulos generados por medio de una secuencia ortogonal Zadoff-Chu (ZC), la cual permite que los Msg1 sean decodificados por la BS. La secuencia ZC es útil ya que tiene propiedades de autocorrelación cero y amplitud constante para generar los preámbulos [10], es decir todas las secuencias generadas están en un círculo unitario y su autocorrelación es cero para todas las interacciones de tiempos diferentes a cero [11], por dichas propiedades la secuencia ZC es idónea para la estimación de canales y la sincronización de tiempo que mejoran la eficiencia en detección de PRACH [12]. En el caso de que dos o más dispositivos transmitan en el mismo preámbulo del RAO, la BS no podrá identificar el intento de RA, por consiguiente, la BS no puede decodificar dichos preámbulos y se producirá una colisión.



**Figura 1.3 Procedimiento de Acceso Aleatorio RA [13]**

**Msg2: Random Access Response.** El UE aguarda por un mensaje de respuesta llamado Random Access Response (RAR), que desde la BS se tiene configurado el ajuste de temporalización y la asignación de recursos de enlace ascendente, mediante el canal físico compartido de enlace descendente (Physical Downlink Shared Channel, PDSCH). Dado que la BS solamente tiene el patrón de señal predefinido, no tiene la suficiente información para identificar el UE que realiza la petición. Si no se recibe el mensaje RAR durante la ventana de tiempo configurada  $W_{RAR}$  (Window RAR) entonces el preámbulo no fue decodificado y regresa al Msg1, retransmitiendo con una potencia más elevada e incrementando el número de intentos en la transmisión del preámbulo.

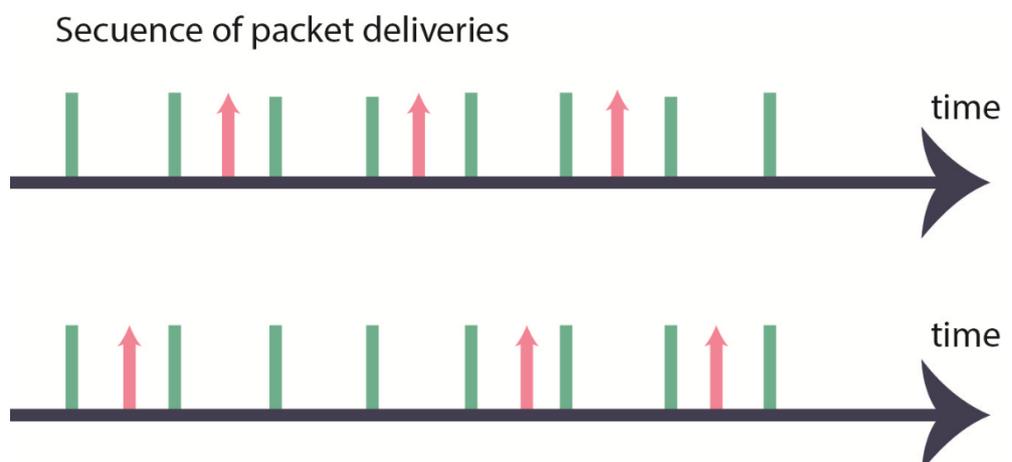
Cada subtrama puede contener hasta un mensaje RAR, mientras que puede tener hasta tres concesiones de enlace ascendente, y cada una contiene respectivamente un preámbulo decodificado exitosamente. La cantidad de  $W_{RAR}$  en subtramas es transmitida por la BS a través del SIB Tipo 2 (SIB2) [14]. En consecuencia, existe un máximo número de concesiones de enlace ascendente que se pueden enviar dentro de un  $W_{RAR}$ . Luego de identificar un preámbulo en el RAO, la BS señala con los datos de ajuste de tiempo y la asignación de recursos uplink, en consecuencia, todos los UE que utilizaron el preámbulo específico en un RAO específico reciben dicha información [8] [15].

**Msg3: Connection Request.** Una vez recibido el Msg2 los UE transmiten el mensaje de solicitud de conexión, el cual contiene el motivo de la solicitud de acceso juntamente con sus identidades. En este punto, si no existen colisiones de preámbulos Msg1, puede ser que se le asigne a más de un dispositivo el mismo recurso para transmitir el Msg3 y en consecuencia producirse una colisión en la BS, los UE en colisión continúan reenviando sus Msg3 sin éxito, hasta que complete el número máximo de intentos entonces se reinicia el proceso de acceso aleatorio.

**Msg4: Contention resolution.** Cuando el Msg3 es recibido con éxito entonces la BS contiene la identidad respectiva, la cual es utilizada para comparar la identidad en el mensaje con la identidad transmitida en el Msg3. Cuando se detecta una coincidencia entre las identidades se tendrá un acceso exitoso, y se empieza a programar las transmisiones de datos. En el caso de no haber coincidencia se programa un nuevo intento de acceso, si varios UEs responden en el mismo preámbulo, la BS selecciona uno de los identificadores de UE, entonces responde con la identidad de UE elegido y solo éste UE reconoce la recepción del Msg4 [16][17].

### 1.4.3 Antigüedad de la Información (*Age of Information, Aol*)

El rendimiento óptimo en un sistema es cuando haya paquetes con retardo mínimo y la entrega es con regularidad, empero existe una gran diferencia entre transmitir paquetes con regularidad y proporcionar un rendimiento mínimo, dado que se puede cumplir con el requisito de rendimiento mínimo, aunque haya periodos prolongados sin entregas. En la figura 1.4 se muestra las diferentes entregas realizadas a tiempo y con retraso; se puede observar que en ambos casos el rendimiento es el mismo (entrega de un mismo número de paquetes en un intervalo de tiempo dado); sin embargo, la regularidad de entrega es diferente.



**Figura 1.4** Esquema sobre la diferencia entre enviar paquetes con regularidad y rendimiento [18]

Tomando como referencia un nodo de origen en un proceso subyacente que varía en el tiempo, el cual transmite un estado muestreado del proceso mediante un canal inalámbrico de comunicación que introduce retrasos; la métrica Aol evalúa el tiempo transcurrido a partir de la generación de la última actualización en una entidad que agrega y procesa la información [19] [1].

Si  $t'_k$  es el instante que se receipta las actualizaciones de estado en el destino, en el momento  $\xi$  entonces el índice de actualización recibida recientemente es:

$$N(\xi) = \max\{k \mid t'_k \leq \xi\} \quad (1.1)$$

Donde la marca de tiempo de la actualización receiptada en el último instante de tiempo es:

$$u(\xi) = t_{N(\xi)} \quad (1.2)$$

La Aol es definida como un proceso aleatorio de la fuente en el destino como:

$$Aol(t) = t - u(t) \quad (1.3)$$

Al observar el sistema en  $t = 0$ , la Aol en el destino es  $Aol(0) = Aol_0$ ; cada actualización de estado  $i$  se genera en el momento  $t_i$ , donde el destino la recibe en el momento  $t'_i$ . Cuando no haya actualizaciones en el destino, la Aol aumenta entre  $t'(i-1)$  y  $t'_i$ , incrementándose en el tiempo. Al recibir una nueva actualización de estado, la Aol se reestablece al retraso que el paquete obtuvo al pasar por el canal.

El tiempo  $i$  –ésimo entre las actualizaciones se establece como el lapso entre la generación de la actualización  $i$  y la generación anterior, por tanto  $Y_i$  es la variable aleatoria.

$$Y = t_i - t_{i-1} \quad (1.4)$$

También,

$$T_i = t'_i - t_i \quad (1.5)$$

es el tiempo de actualización del sistema  $i$ , donde se introduce la transferencia por medio del canal en el intervalo de observación  $t = 0$  a  $t = T = t_n$ , se presenta el número de llegadas por el tiempo  $T$ .

$$N(T) = \max\{n \mid t_n \leq T\} \quad (1.6)$$

Entonces en  $t'$ , para todos los  $i = 1, 2, \dots, N(T)$ , la edad  $AoI(t'_i)$ , se redefine a  $T_i = t'_i - t_i$ , donde se minimiza la antigüedad con cada actualización receptada, la cual estima la frescura de la información de estado en la fuente del destino. Si no se tiene actualizaciones recibidas en el destino de los tiempos que no pertenecen al conjunto  $I = t'_1, t'_2, \dots, t'_{N(T)}$ , entonces la edad aumenta a medida que transcurre el tiempo, lo que resulta el proceso de edad en el patrón de diente de sierra como se muestra en la figura 1.5.

La forma típica de evaluar la  $AoI$  de una fuente en el destino es la media temporal de  $AoI$  [20][1][13], la cual se utiliza en el presente estudio, dado que la media temporal más baja indica que la información de estado obtenida por el destino es más reciente y refleja mejor el estado de un objetivo. La media temporal  $AoI$  durante un intervalo de duración  $T$  es el

área bajo la curva, considerando un intervalo de observación  $(0, T)$ , la media temporal  $AoI$  de un sistema de actualización de estado es:

$$\overline{AoI} = \frac{1}{T} \int_0^T AoI(t) dt \quad (1.7)$$

Desde  $t = 0$ , el área se descompone en el área del polígono  $Q_1$ , donde  $i = 1, 2, 3, \dots, N(T)$ , adicionándose el área triangular de ancho  $T_n$  representado como  $\tilde{Q}$ , entonces la descomposición de  $AoI$  induce a la presentada en la figura 1.5.

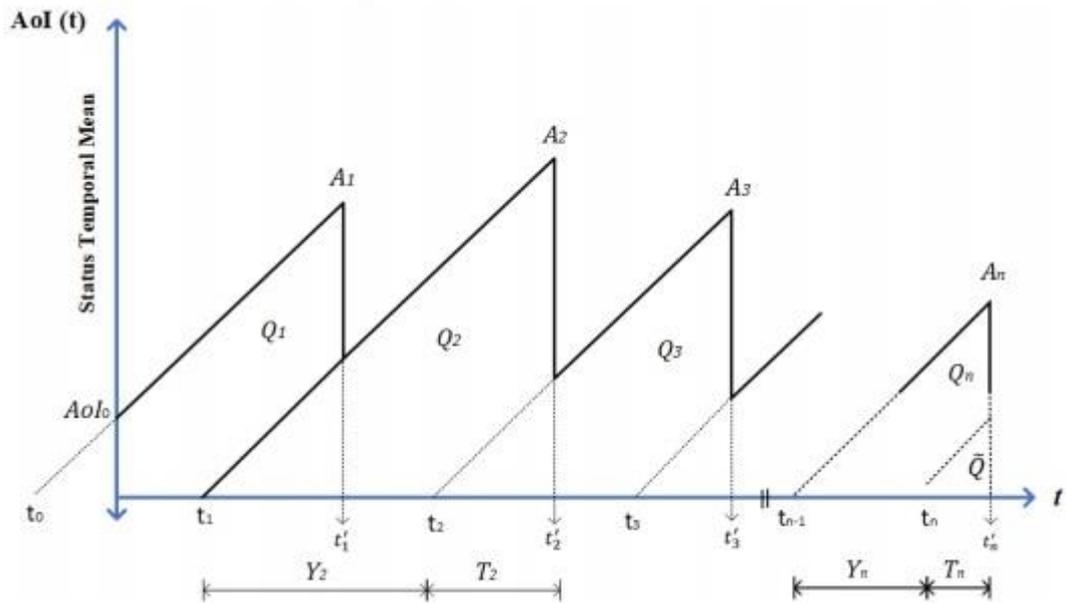


Figura 1.5 La evolución de la AoI en el tiempo [1]

$$\overline{AoI} = \frac{1}{T} \left( Q_1 + \tilde{Q} + \sum_{i=2}^{N(T)} Q_i \right) = \frac{Q_1 + \tilde{Q}}{T} + \frac{N(T)-1}{T} \frac{1}{N(T)-1} \sum_{i=2}^{N(T)} Q_i \quad (1.8)$$

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

La metodología que se utilizó en esta investigación se basa en el enfoque de investigación experimental. Se evaluaron escenarios de comunicaciones masivas en IoT celular desde la perspectiva de la antigüedad de la información (Aol). Para esto, se desarrolló un modelo de simulación del canal de acceso aleatorio en redes LTE-A y se definió la métrica basada en la Aol. Se evaluaron diferentes escenarios con diferentes patrones de generación de actualizaciones por parte de los dispositivos IoT. Se realizaron una serie de experimentos numéricos que dependen de las variables: número de usuarios y el número de actualizaciones generadas. Se seleccionó la variable tiempo que permanezca constante, mientras las demás variables son manejadas con diferentes criterios. Se analizaron los resultados obtenidos para determinar el comportamiento de los múltiples escenarios.

### 2.1 Modelo del sistema y parámetros de configuración

En la representación del modelo del sistema se ha tomado en cuenta una estación base (BS), a la cual requieren acceder un conjunto de dispositivos MTC, los cuales constituyen los dispositivos IoT. En primera instancia los dispositivos se encuentran desconectados o inactivos, cabe recalcar que los dispositivos interactúan sin la intervención del ser humano, emitiendo eventos de un sistema de misión crítica. En la figura 2.2, se considera inactivo o desconectado cuando el tiempo es  $t < 0$ , en el instante  $t = 0$ , los dispositivos MTC comienzan a generar actualizaciones siguiendo un patrón de frecuencias preestablecido que se detalla en la sección 2.2. El momento que los dispositivos generan actualizaciones cambian de estado inactivo a estado activo, inmediatamente se inicia el proceso de Acceso Aleatorio (RA), ilustrado en la figura 2.3, con el fin de solicitar recursos a la estación base (BS).

La masiva cantidad de dispositivos UE que compiten entre sí por un canal de acceso se ilustra en la figura 2.1, donde cada uno de ellos requieren reportar

algún evento específico a la BS, la cual debe depurar la información obsoleta de actualizaciones con información más fresca.

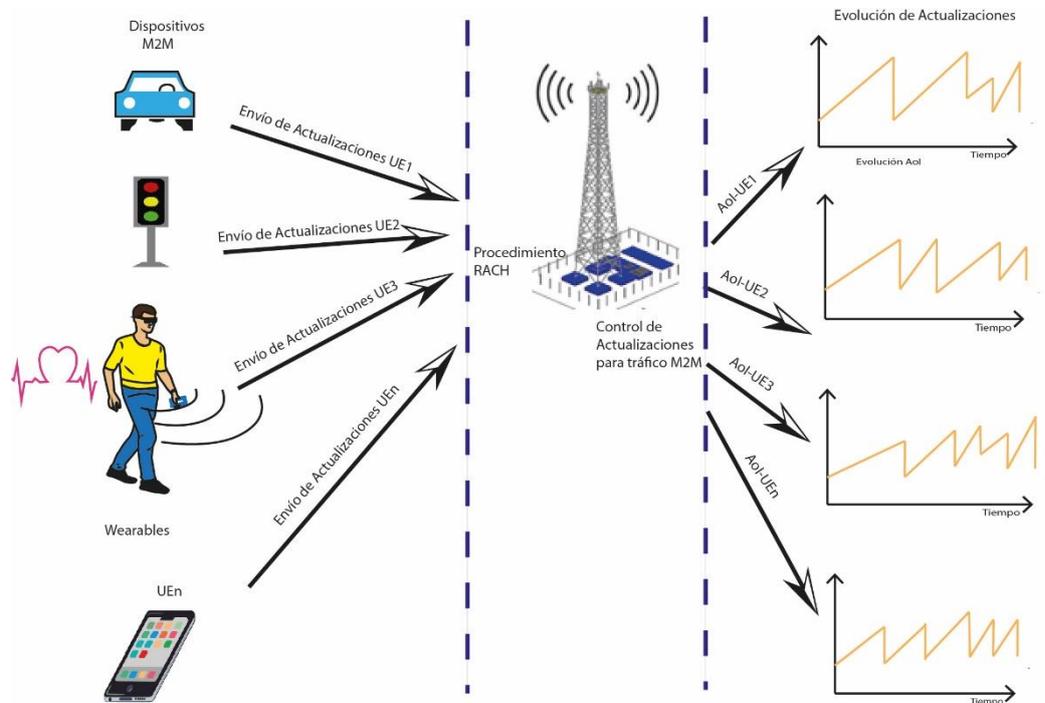


Figura 2.1 El modelo del sistema. Elaboración Propia

## 2.2 Patrones de generación de actualizaciones por dispositivos IoT

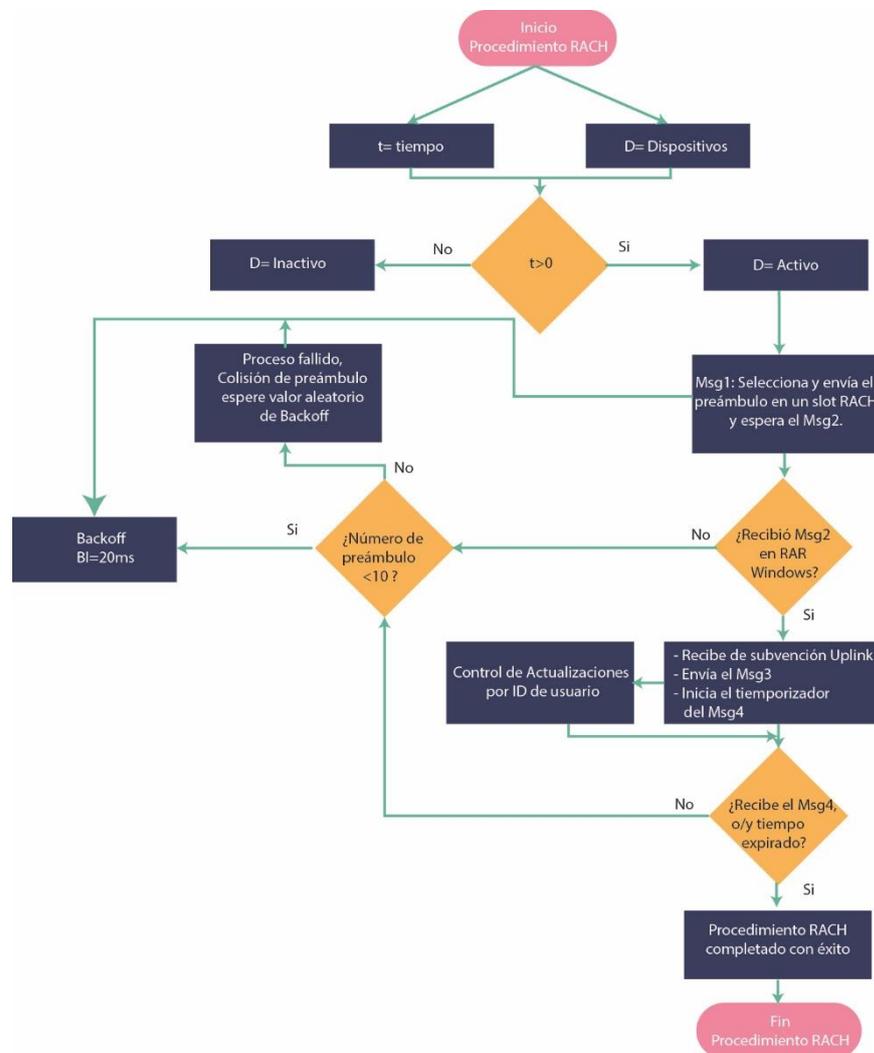
Para la configuración se usaron los parámetros sugeridos en [21]. Definidos en detalle en la tabla 2.1. Referente al tráfico MTC, se utilizaron cuatro diferentes patrones de actualización, que se detallan a continuación:

**Exponencial:** para este tipo de actualizaciones, el tiempo entre actualizaciones sigue la distribución exponencial, por medio de un proceso de Poisson de tasa  $U$ .

**Uniforme:** el instante de tiempo que se envía una actualización es de manera uniforme, validando que en cada intervalo exista solo una actualización.

**Phi1: Tiempo constante entre actualizaciones con dispositivos sincronizados:** las actualizaciones de los UEs se realizan con un determinado desfase  $\emptyset$ , el cuál es el mismo para todos los usuarios.

**Phi2: Tiempo constante entre actualizaciones con dispositivos no sincronizados:** aleatoriamente se asigna un desfase distinto a cada usuario para el envío de una actualización.



**Figura 2.2 Diagrama de flujo del procedimiento de acceso aleatorio.  
Elaboración Propia**

En las últimas tres generaciones de actualizaciones nombradas, se describen que el tiempo es fraccionado entre actualizaciones  $T_u$ , lo cual es equivalente a la inversa de la tasa en llegadas de actualizaciones,  $T_u = \left(\frac{u}{1000}\right)^{-1}$ , diferenciándose entre sí por la forma de seleccionar el instante prudencial para generar actualizaciones.

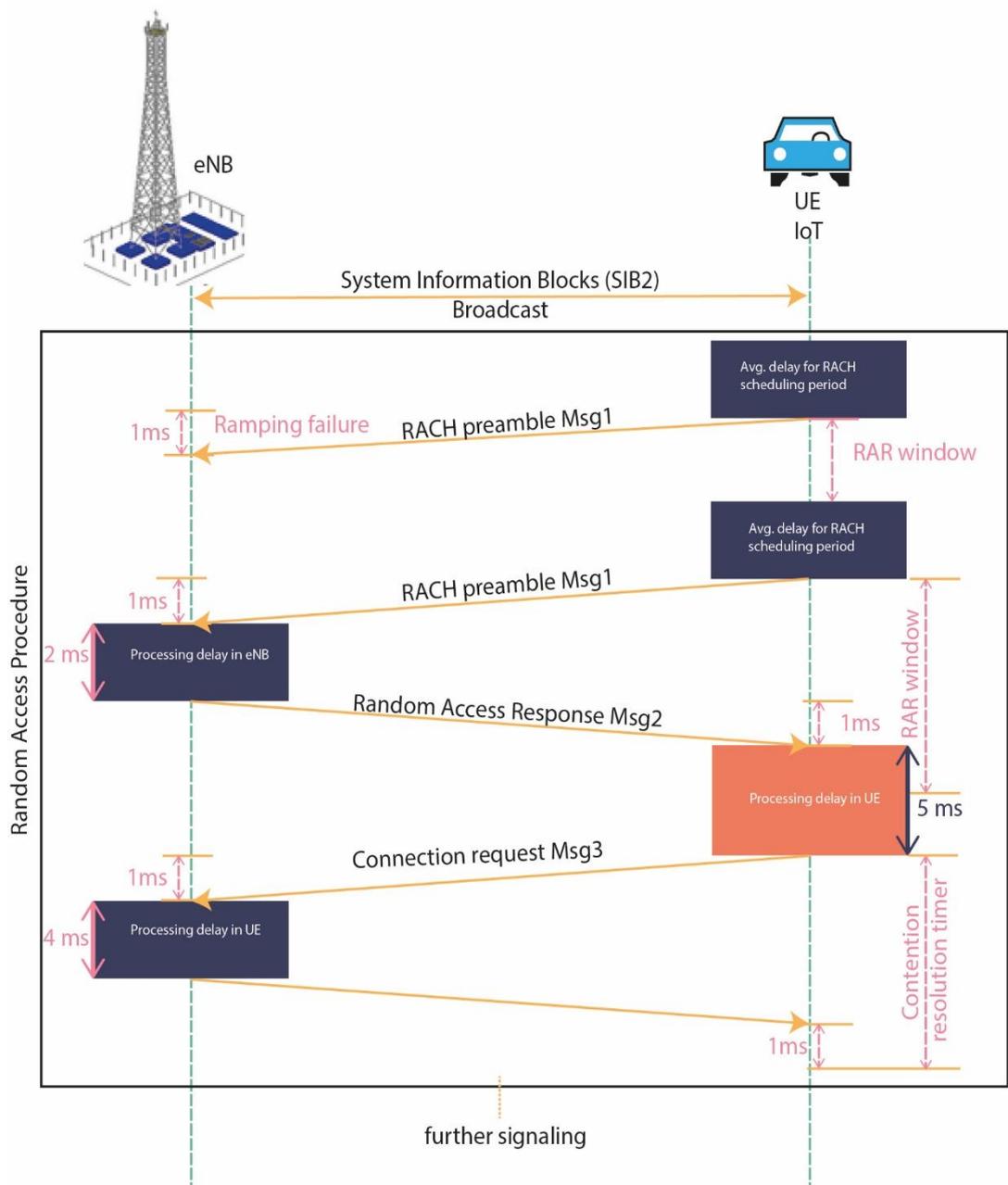


Figura 2.3 Detalle del procedimiento RA en el tiempo [8]

### 2.3 Control de actualizaciones y registro de la métrica Aol en la estación base

Las actualizaciones realizadas por cada usuario se controlan en cada RAO, cuyos mensajes de actualización se reciben indistintamente.

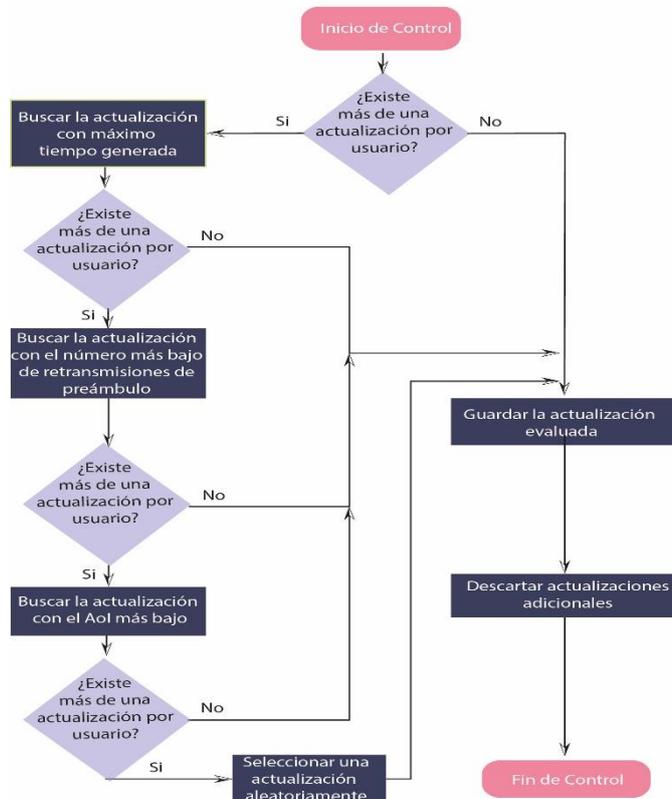
**Tabla 2.1 RACH Configuration [21]**

| <i>Parameter</i>                              | <i>Setting</i>                         |
|---|--|
| PRACH Configuration Index                     | prach-ConfigIndex = 6                  |
| Periodicity of RAOs                           | 5 ms                                   |
| Subframe length                               | 1 ms                                   |
| Available preambles for                       | R = 54                                 |
| Maximum number of preamble transmissions      | preambleTransMax = 10                  |
| RAR window size                               | $W_{RAR} = 5$ subframes                |
| Maximum number of uplink grants per subframe  | $N_{UL} = W_{RAR} \times N_{RAR} = 15$ |
| Backoff Indicator                             | BI = 20 ms                             |
| mac-ContentionResolutionTimer                 | 48 subframes                           |
| Re-transmission probability for Msg3 and Msg4 | 0,1                                    |
| Maximum number of Msg3 and Msg4 transmissions | 5                                      |
| Preamble processing delay                     | 2 subframes                            |
| Uplink grant processing delay                 | 5 subframes                            |
| Connection request processing delay           | 4 subframes                            |
| Round-trip time (RTT) of Msg3                 | 8 subframes                            |
| RTT of Msg4                                   | 5 subframes                            |

Dos escenarios diferentes son posibles. En el primer escenario si llegó solo un paquete de su respectivo UE se transmite de forma inmediata, en el segundo escenario si llegó más de un paquete de un determinado UE, se procede a depurar la actualización como sigue:

1. Se excluyeron las actualizaciones conforme a tiempo de llegada, seleccionando la actualización más reciente.
2. Si el número de transmisión de preámbulos excede a los 10 intentos permitidos [2], al depurar dichas transmisiones se analizó la variable correspondiente a la cantidad de intentos, seleccionando la que tenga menor número de intentos debido a que a mayor cantidad de intentos se eleva el AoI.
3. Si existieron más de dos actualizaciones que superaron los dos procesos anteriores, se excluyeron las actualizaciones según la marca de tiempo, seleccionando aquella que contenga el menor AoI.
4. Si las actualizaciones superaron los procesos anteriores más de dos actualizaciones, se selecciona aleatoriamente una actualización.

El procedimiento antes descrito se presenta en la figura 2.4 mediante un diagrama de flujo.



**Figura 2.4 Diagrama de flujo control de actualizaciones por UE.**

**Elaboración Propia**

## 2.4 Función de coste para evaluar el sistema considerando la métrica Aol, el número de actualizaciones que generan los dispositivos y el número de retransmisiones utilizados por estos

El modelo de simulación consiste en un entorno IoT basado en infraestructura celular, muy utilizada por su movilidad, cobertura, seguridad y ubicuidad. Se utilizó la métrica Aol que cuantifica el tiempo transcurrido desde la generación de la última actualización de estado de un dispositivo, recibida en la BS, para conocer qué tan fresca es la información.

En el sistema se tienen  $N$  dispositivos, y cada dispositivo registró la Aol, considerando desde el instante que se generó la actualización hasta que arribó a la BS, así cada usuario generó una curva diferente de actualización, esto implica que en un instante dado se tienen  $N$  puntos. Para obtener la métrica general del sistema, se tienen tres alternativas: el máximo de todas las medidas en un determinado punto que se lo registró como medida del sistema, se tiene también el promedio en un determinado punto y el mínimo que es la medida que no se consideró porque no siempre va a ocurrir a todos los usuarios el mejor de los casos con menos tiempo entre actualizaciones.

La retransmisión de paquetes induce a un mayor consumo de energía, conjuntamente si se genera demasiadas actualizaciones con el fin de tener más fresca la información en el sistema, lo que provocó una saturación en la capacidad del canal. Bajo esta premisa se buscó un compromiso entre el número de actualizaciones y la energía que ocupa el dispositivo al actualizar, también para buscar un compromiso con la Aol. Con estos antecedentes se plantea la siguiente función de coste para evaluar el sistema:

$$C = \frac{1}{(\overline{Aol})^\alpha (U.K)^\beta} \quad (2.1)$$

Donde  $\overline{Aol}$  es la media temporal de las actualizaciones de usuario en un punto dado,  $U$  representa el número de actualizaciones que generan los usuarios,

$K$  representa el número de retransmisiones de preámbulos enviados por el UE determinado. Tanto  $\alpha$  como  $\beta$  son los pesos para cada parámetro de la función de coste.

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan los resultados de la aplicación de los diferentes patrones de generación de actualizaciones de los UE MTC en el modelo del sistema con los parámetros de configuración establecidos anteriormente. De estas pruebas se obtuvieron datos de la métrica Aol para diferentes escenarios, lo que permitió evaluar su comportamiento y obtener diversas gráficas.

### 3.1 Efecto de los patrones de generación de actualizaciones en la métrica Aol

En la generación de actualizaciones, se consideró que el tiempo de simulación  $T$ , se mantuviera en un minuto; el cual representa un tiempo prudencial para la toma de muestras. Por cada dispositivo se obtiene una  $AoI_i(t)$ , la  $i$  representa cada UE MTC del sistema, que varió según  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ , luego se adiciona la dimensión de los dispositivos con el fin de obtener  $AoI(t)$ , la cual se realizó de dos maneras:

- Se calculó el máximo de todas las actualizaciones:

$$AoI(t) = \max_i \{AoI_i(t)\} \quad (3.1)$$

- Se calculó el promedio de todas las actualizaciones:

$$AoI(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N AoI_i(t) \quad (3.2)$$

A continuación, se procedió a calcular la media temporal según la ecuación 1.7), y se reportan los resultados de cada tipo de actualización. En cada gráfica se presenta el valor correspondiente al número de actualizaciones generadas por cada usuario en el eje de las abscisas, mientras que el eje de las ordenadas se presenta la media temporal de Aol.

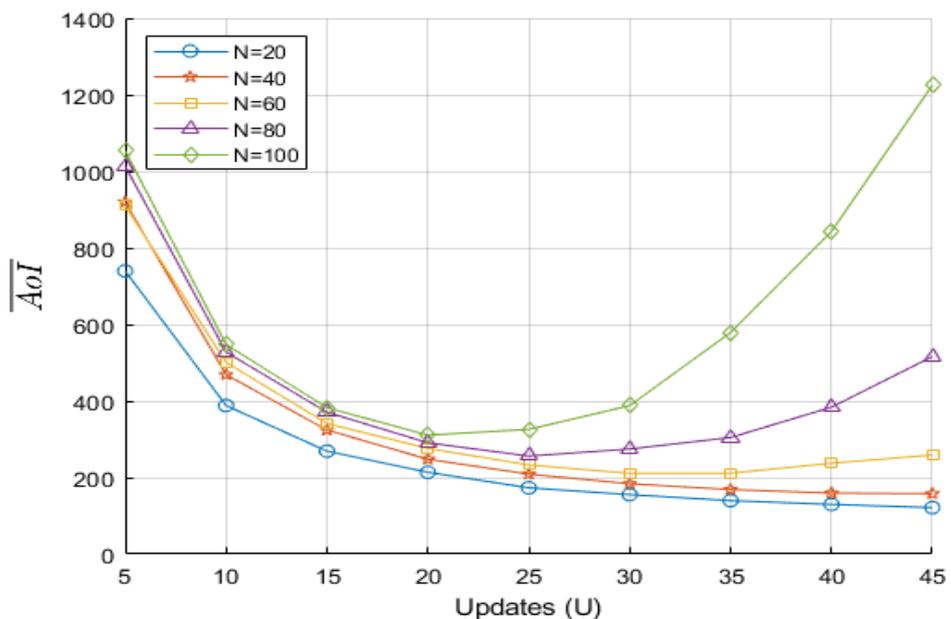
#### 3.1.1 Patrón de generación de actualizaciones exponencial

Los valores generados en el modelo de simulación en cuanto a la actualización exponencial se presentan en la tabla 3.1, en los cuales se

observa que a medida que los valores de N son bajos el canal no está saturado y al aumentar la frecuencia de actualizaciones la Aol disminuye; entre tanto que cuando los valores de N son altos, el efecto de incrementar la frecuencia de actualizaciones impacta negativamente en la Aol. Estos resultados se ilustran en las figuras 3.1 y 3.2; analizando la curva cuando N=80, se halló que al aumentar el número de actualizaciones hasta el punto U=25 beneficia significativamente a la Aol; sin embargo, con valores de U>25, el hecho de aumentar el número de actualizaciones de los dispositivos repercute negativamente a la Aol. El mismo efecto se observa utilizando el cálculo con valores máximos representados en la tabla 3.1, como utilizando valores promedio mostrados en la tabla 3.2.

**Tabla 3.1 Valores máximos de las actualizaciones exponenciales**

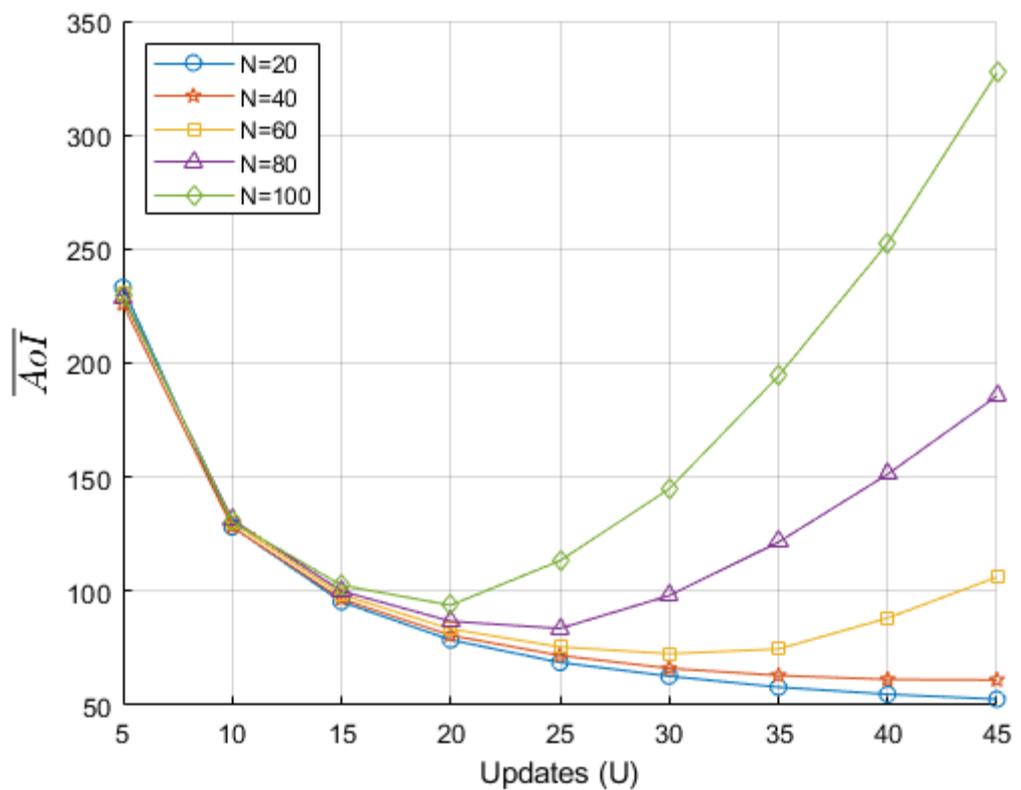
| U \ N | 5       | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45      |
|-------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 20    | 739,68  | 388,10 | 268,94 | 213,74 | 173,14 | 155,36 | 139,73 | 129,91 | 121,44  |
| 40    | 919,97  | 468,66 | 324,14 | 247,84 | 208,88 | 183,76 | 168,66 | 159,37 | 157,77  |
| 60    | 911,06  | 500,92 | 341,15 | 276,07 | 232,89 | 211,02 | 211,49 | 237,45 | 258,94  |
| 80    | 1013,44 | 527,63 | 370,69 | 290,76 | 256,11 | 274,53 | 304,68 | 383,81 | 516,18  |
| 100   | 1053,44 | 547,67 | 382,35 | 310,84 | 325,82 | 387,86 | 579,02 | 842,84 | 1225,17 |



**Figura 3.1 Representación de los datos de la tabla 3.1**

**Tabla 3.2 Valores promedio de las actualizaciones exponenciales**

| U \ N | 5      | 10     | 15     | 20    | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     |
|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 20    | 233,17 | 128,15 | 95,34  | 78,60 | 68,72  | 62,72  | 57,88  | 54,78  | 52,60  |
| 40    | 225,86 | 128,13 | 96,56  | 80,62 | 71,77  | 66,13  | 63,02  | 61,27  | 61,06  |
| 60    | 230,19 | 130,22 | 98,45  | 83,38 | 75,54  | 72,54  | 74,62  | 88,20  | 106,20 |
| 80    | 228,94 | 131,48 | 100,00 | 86,79 | 83,62  | 98,03  | 121,48 | 151,28 | 185,59 |
| 100   | 229,63 | 130,49 | 102,55 | 93,82 | 113,35 | 144,80 | 194,32 | 252,61 | 327,34 |



**Figura 3.2 Representación de los datos de la tabla 3.2**

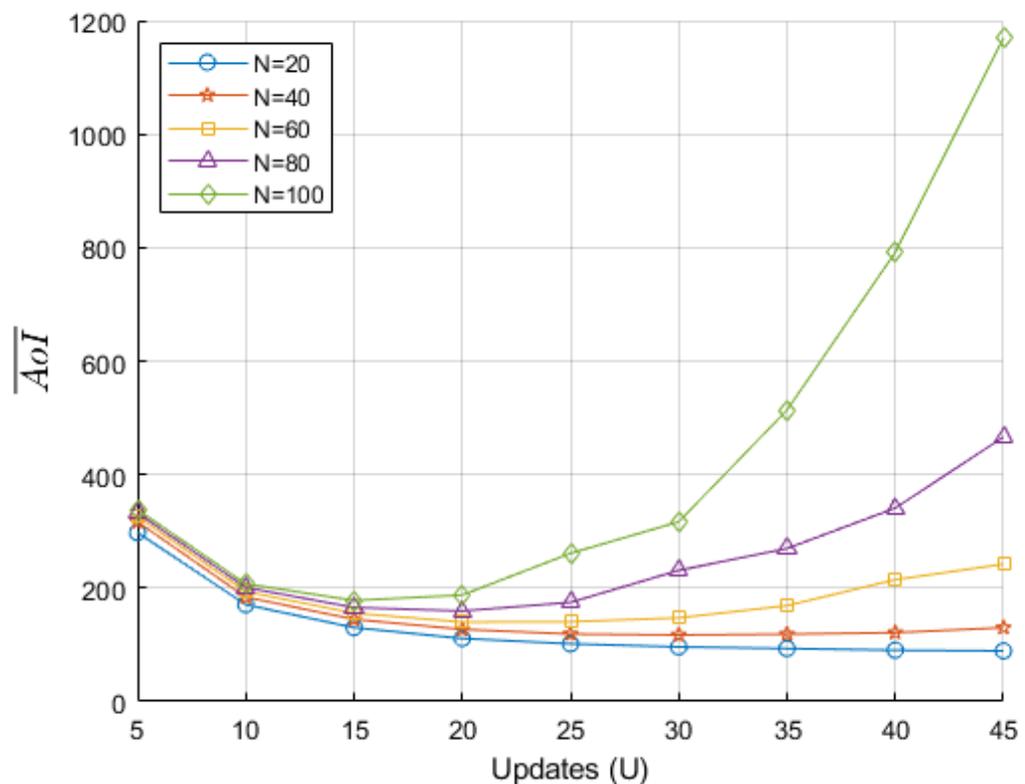
### 3.1.2 Patrón de generación de actualizaciones Uniforme

En las tablas 3.3 y 3.4, se muestran los valores generados por el modelo de simulación para los UEs MTC, utilizando el patrón de generación de actualizaciones uniforme. Visualizando los resultados en las figuras 3.3 y 3.4, se observa que cuando el canal no está saturado, es decir los valores de N son bajos, al incrementar la frecuencia de actualizaciones la AoI disminuye, entre tanto que cuando el canal está saturado accionado por los

valores de N altos, el hecho de incrementar la frecuencia de actualizaciones impacta negativamente en la Aol. Analizando la curva cuando N=20, se observa que al aumentar U beneficia escasamente a la Aol, mientras que analizando la curva de N=100, se observa que, al inicio de esta, beneficia a la Aol hasta el punto U=15, de allí en adelante el hecho de aumentar la frecuencia de actualizaciones tiene un efecto perjudicial para la Aol.

**Tabla 3.3 Valores máximos de las actualizaciones uniformes**

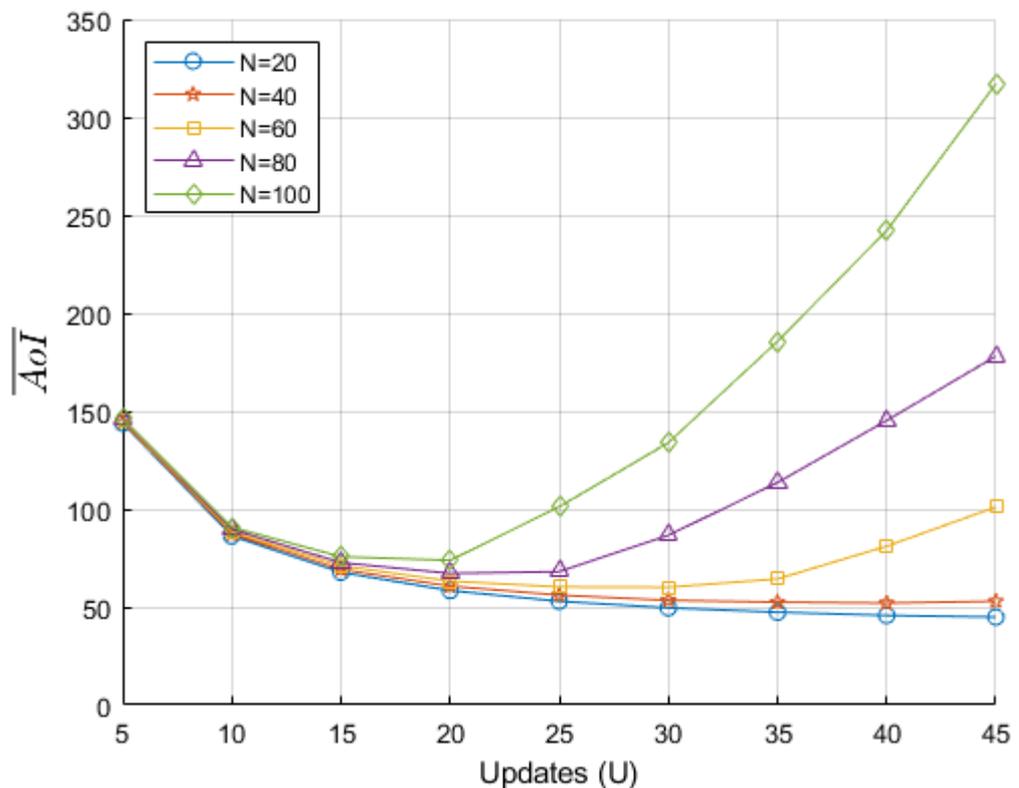
| $\frac{N}{U}$ | 5      | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45      |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 20            | 297,82 | 170,73 | 130,25 | 111,08 | 101,70 | 96,24  | 93,33  | 90,43  | 89,22   |
| 40            | 316,71 | 184,01 | 144,88 | 127,12 | 118,95 | 117,22 | 118,72 | 121,32 | 130,08  |
| 60            | 325,98 | 193,83 | 155,79 | 140,05 | 140,53 | 147,39 | 168,92 | 214,75 | 242,09  |
| 80            | 332,21 | 200,92 | 165,70 | 159,48 | 174,71 | 231,17 | 269,67 | 340,99 | 466,23  |
| 100           | 338,24 | 207,28 | 178,08 | 187,61 | 261,25 | 316,71 | 513,63 | 791,50 | 1169,56 |



**Figura 3.3 Representación de los datos de la tabla 3.3**

**Tabla 3.4 Valores promedios de las actualizaciones uniformes**

| N \ U | 5      | 10    | 15    | 20    | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     |
|-------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 20    | 143,83 | 86,25 | 67,72 | 58,41 | 52,94  | 49,59  | 47,35  | 45,74  | 44,87  |
| 40    | 144,38 | 87,35 | 69,19 | 60,66 | 56,10  | 53,42  | 52,50  | 52,02  | 52,98  |
| 60    | 145,09 | 88,39 | 71,04 | 63,23 | 60,30  | 60,11  | 64,37  | 81,07  | 101,05 |
| 80    | 145,62 | 89,62 | 72,68 | 67,19 | 68,07  | 86,65  | 113,56 | 145,23 | 177,98 |
| 100   | 146,14 | 90,73 | 75,70 | 73,87 | 101,20 | 133,89 | 185,56 | 242,12 | 316,98 |



**Figura 3.4 Representación de los datos de la tabla 3.4**

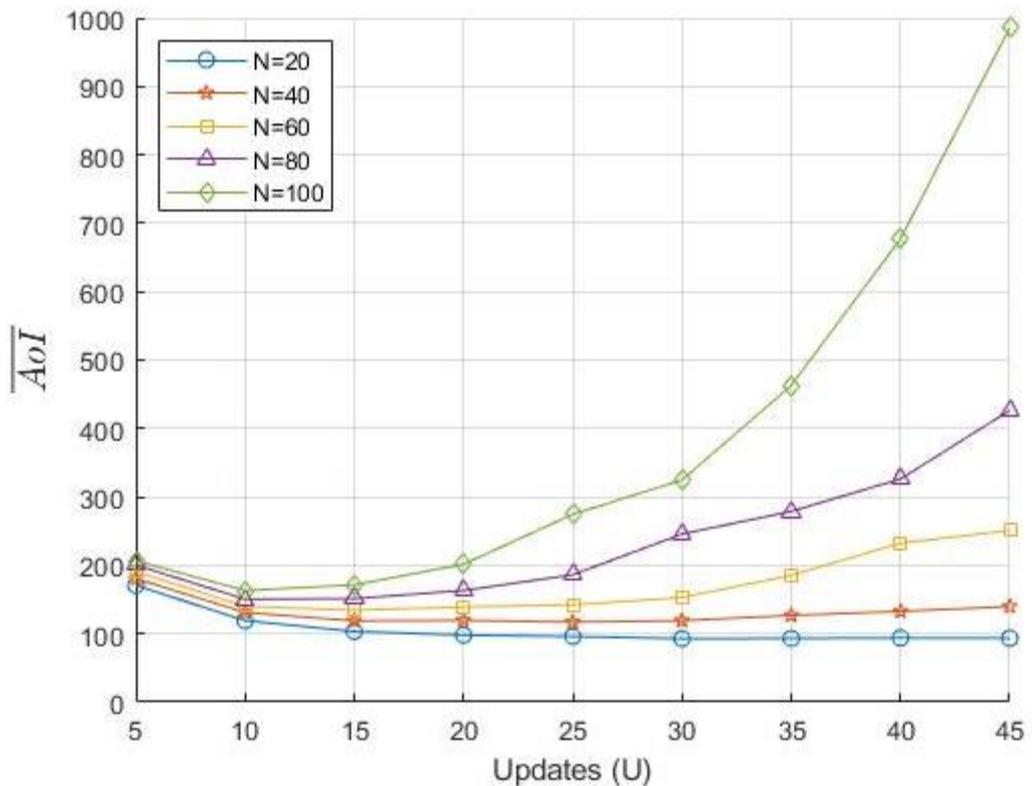
### 3.1.3 Patrón de generación de actualizaciones *Phi1*

Los valores que se obtuvieron utilizando la actualización *Phi1* mostrados en las tablas 3.5 y 3.6, cuando el tiempo entre dichas actualizaciones era constante en los dispositivos sincronizados, se observó que cuando N es bajo el canal no está saturado y que al aumentar la frecuencia de actualizaciones la AoI disminuyó; entre tanto que cuando los valores de N son altos el canal está saturado y se halló que el hecho de incrementar la frecuencia de actualizaciones impacta negativamente en la AoI. Estos

resultados se muestran gráficamente en las figuras 3.5 y 3.6. Analizando la curva para N=20, se observó que al incrementar U beneficia a la Aol escasamente, mientras que al analizar la curva N=100, se observó que al aumentar U beneficia a la Aol hasta el punto U=10 en los valores máximos y en los valores promedios en el punto U=15, y después de dichos puntos el hecho de incrementar la frecuencia de actualizaciones tornó un efecto perjudicial para la Aol.

**Tabla 3.5 Valores máximos de las actualizaciones Phi1**

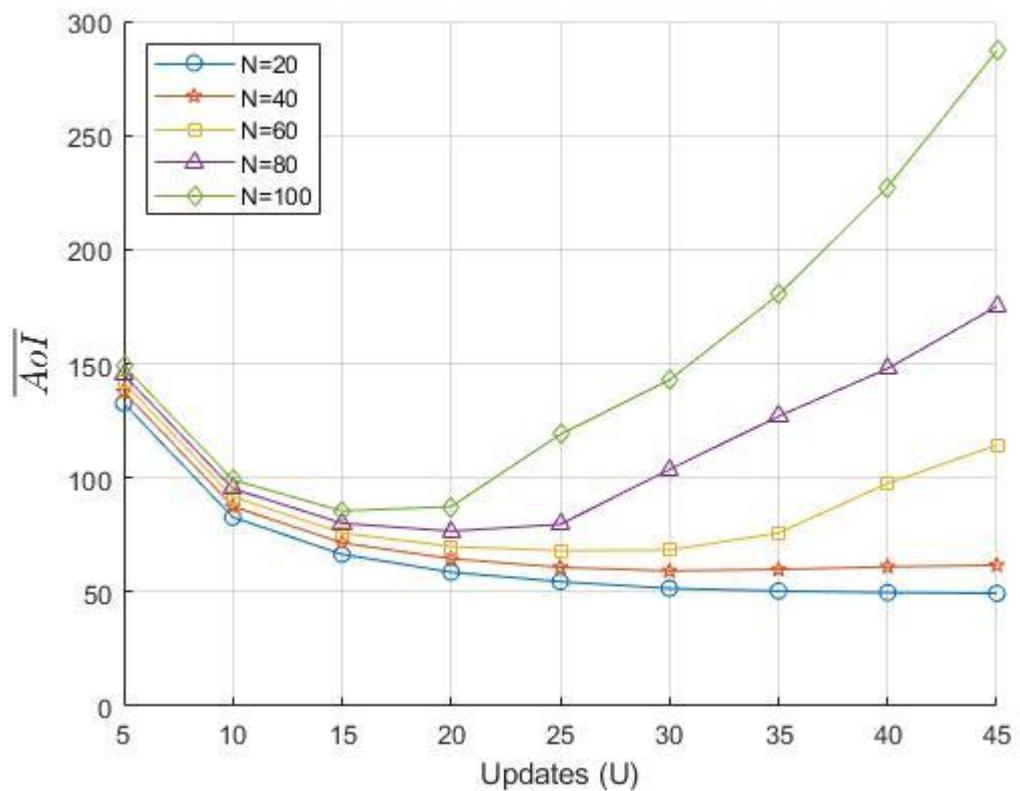
| U \ N | 5      | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 20    | 170,86 | 119,06 | 103,41 | 97,99  | 96,01  | 92,86  | 93,25  | 93,90  | 93,44  |
| 40    | 180,56 | 131,16 | 118,86 | 119,53 | 117,01 | 119,17 | 126,81 | 132,72 | 139,79 |
| 60    | 190,78 | 140,18 | 134,39 | 139,15 | 142,20 | 153,08 | 185,36 | 232,50 | 251,06 |
| 80    | 200,30 | 150,57 | 151,33 | 163,20 | 186,21 | 245,74 | 278,88 | 326,20 | 426,42 |
| 100   | 206,54 | 163,10 | 171,38 | 201,62 | 274,55 | 324,64 | 462,90 | 677,00 | 985,76 |



**Figura 3.5 Representación de los datos de la tabla 3.5**

**Tabla 3.6 Valores promedios de las actualizaciones Phi1**

| N \ U | 5      | 10    | 15    | 20    | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     |
|-------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 20    | 132,64 | 82,74 | 66,47 | 58,64 | 54,47  | 51,56  | 50,39  | 49,71  | 49,36  |
| 40    | 137,67 | 87,48 | 71,50 | 64,51 | 60,78  | 59,21  | 59,84  | 61,01  | 61,68  |
| 60    | 141,77 | 91,63 | 75,84 | 69,89 | 68,05  | 68,32  | 75,78  | 97,56  | 114,30 |
| 80    | 145,05 | 95,20 | 80,10 | 76,62 | 79,59  | 103,61 | 126,94 | 147,86 | 175,04 |
| 100   | 149,01 | 99,07 | 85,45 | 87,38 | 119,01 | 142,78 | 180,19 | 227,38 | 286,96 |



**Figura 3.6 Representación de los datos de la tabla 3.6**

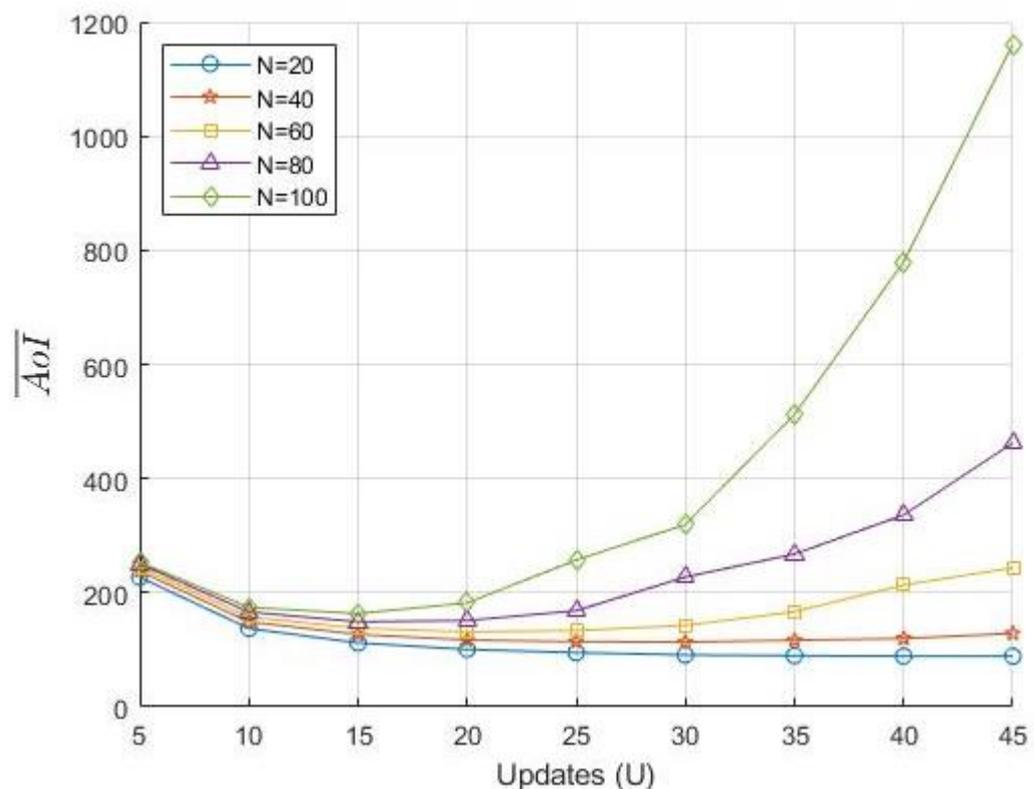
### 3.1.4 Patrón de generación de actualizaciones *Phi2*

Mediante los datos obtenidos de las actualizaciones *Phi2* mostrados en las tablas 3.7 y 3.8, cuando el tiempo entre las actualizaciones es constante y desfasado en cada UE MTC, se observó que cuando los valores de N son bajos el canal no está saturado y que al aumentar la frecuencia de actualizaciones la Aol disminuye; entre tanto que cuando los valores de N son altos el canal estaba saturado y que el hecho de aumentar la frecuencia de actualizaciones impacta negativamente en la Aol. En las figuras 3.7 y

3.8 se representa en el eje de las ordenadas la media temporal  $\overline{AoI}$  y en el eje de las abscisas el número de actualizaciones U; analizando la curva cuando N=60, se observa que al aumentar U beneficia escasamente a la AoI, mientras que analizando la curva N=100, se observa que, al inicio de dicha curva, al aumentar U beneficia a la AoI hasta el punto U=15, y después de este punto el hecho de aumentar la frecuencia de actualizaciones repercute perjudicialmente a la AoI.

**Tabla 3.7 Valores máximos de las actualizaciones Phi2**

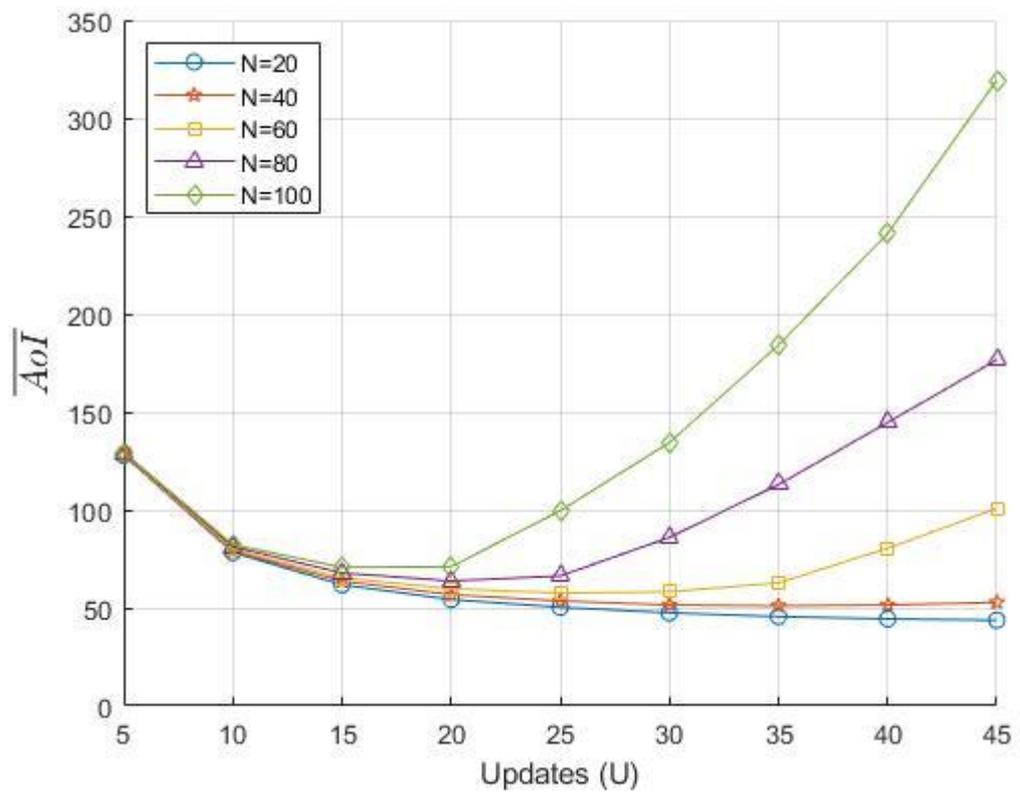
| U \ N | 5      | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45      |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 20    | 227,03 | 137,37 | 112,11 | 100,64 | 95,04  | 91,06  | 89,69  | 88,96  | 88,77   |
| 40    | 237,89 | 148,98 | 126,96 | 117,17 | 114,25 | 113,39 | 116,86 | 119,79 | 128,80  |
| 60    | 244,17 | 157,50 | 137,83 | 131,40 | 133,74 | 142,71 | 166,74 | 213,74 | 243,55  |
| 80    | 250,11 | 166,36 | 148,97 | 151,29 | 168,55 | 227,53 | 267,75 | 336,20 | 462,61  |
| 100   | 253,29 | 174,36 | 163,49 | 182,14 | 257,39 | 319,43 | 512,57 | 779,55 | 1161,13 |



**Figura 3.7 Representación de los datos de la tabla 3.7**

**Tabla 3.8 Valores promedios de las actualizaciones Phi2**

| U \ N | 5      | 10    | 15    | 20    | 25    | 30     | 35     | 40     | 45     |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 20    | 127,83 | 78,30 | 61,81 | 54,26 | 50,31 | 47,50  | 45,53  | 44,39  | 43,69  |
| 40    | 128,03 | 79,00 | 63,67 | 56,77 | 53,53 | 51,47  | 51,00  | 51,47  | 52,79  |
| 60    | 128,61 | 79,81 | 65,30 | 59,74 | 57,56 | 58,25  | 62,78  | 80,40  | 100,89 |
| 80    | 128,91 | 81,17 | 67,81 | 63,76 | 66,30 | 85,97  | 112,98 | 144,66 | 176,66 |
| 100   | 129,45 | 82,24 | 70,71 | 71,02 | 99,62 | 134,38 | 184,19 | 241,03 | 319,32 |



**Figura 3.8 Representación de los datos de la tabla 3.8**

### 3.2 Análisis de la probabilidad de acceso satisfactorio en función del número de actualizaciones

Se calculó la probabilidad de acceso satisfactorio  $P_s$ , donde se encontró comportamientos similares en los diferentes escenarios de simulación, presentados en la figura 3.9. Con un determinado valor de  $U$  mengua la disponibilidad de recursos del sistema con evidente notoriedad, siendo  $P_s < 0,9$ . Se contrasta con los escenarios analizados en secciones anteriores, y se concluye que al disminuir  $P_s$ , el cual constituye el punto de inflexión, el aumento de  $U$  deteriora el rendimiento del sistema. Resultando que cuando el sistema estaba con baja carga era más tolerante al aumento de  $U$ , efecto observado en la tabla 3.9, siendo  $N=40$  y  $U=35$ , mientras que cuando el sistema tenía sobrecarga con  $N=100$  y con valores de  $U > 10$ , influyó negativamente al rendimiento del sistema.

**Tabla 3.9 Probabilidad de acceso satisfactorio  $P_s$**

| U \ N | 5 | 10 | 15      | 20      | 25      | 30      | 35      | 40      | 45      |
|-------|---|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 20    | 1 | 1  | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       |
| 40    | 1 | 1  | 1       | 1       | 1       | 1       | 0,99996 | 0,99993 | 0,99963 |
| 60    | 1 | 1  | 1       | 0,99998 | 0,99996 | 0,99974 | 0,99813 | 0,96151 | 0,82269 |
| 80    | 1 | 1  | 0,99998 | 0,99989 | 0,99902 | 0,96798 | 0,77718 | 0,51268 | 0,30806 |
| 100   | 1 | 1  | 0,99994 | 0,99915 | 0,94076 | 0,65557 | 0,34325 | 0,18984 | 0,11231 |

### 3.3 Máximo valor del número de actualizaciones para una determinada carga del sistema

Conforme a los experimentos realizados, se determinó el número de actualizaciones óptimas de modo que  $P_s$  sea mayor a 0,97 (requerimiento de fiabilidad del sistema). Tomando en consideración el máximo valor de  $U$ , en función del valor de  $N$ , de tal forma que la métrica Aol no sea afectada a medida que la carga aumente, cuyos resultados se presentan en la figura 3.10.

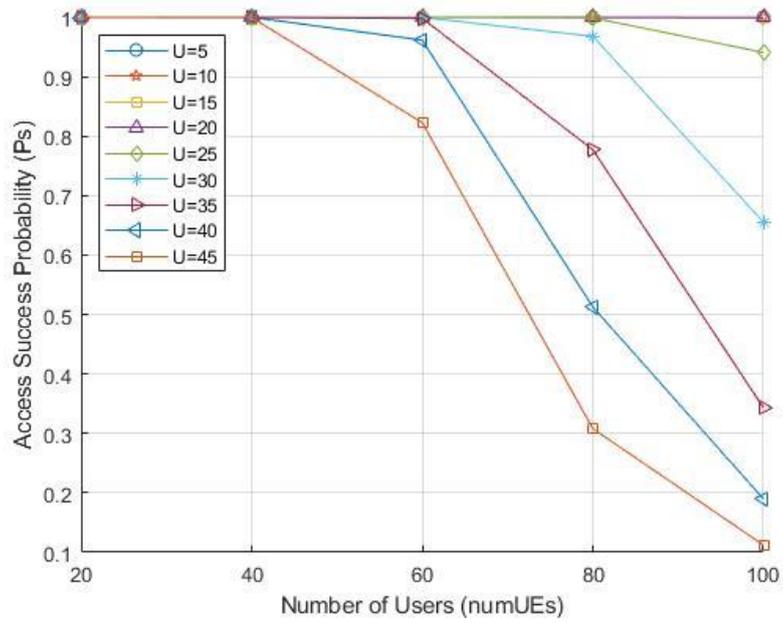


Figura 3.9 Probabilidad de acceso satisfactorio  $P_s$

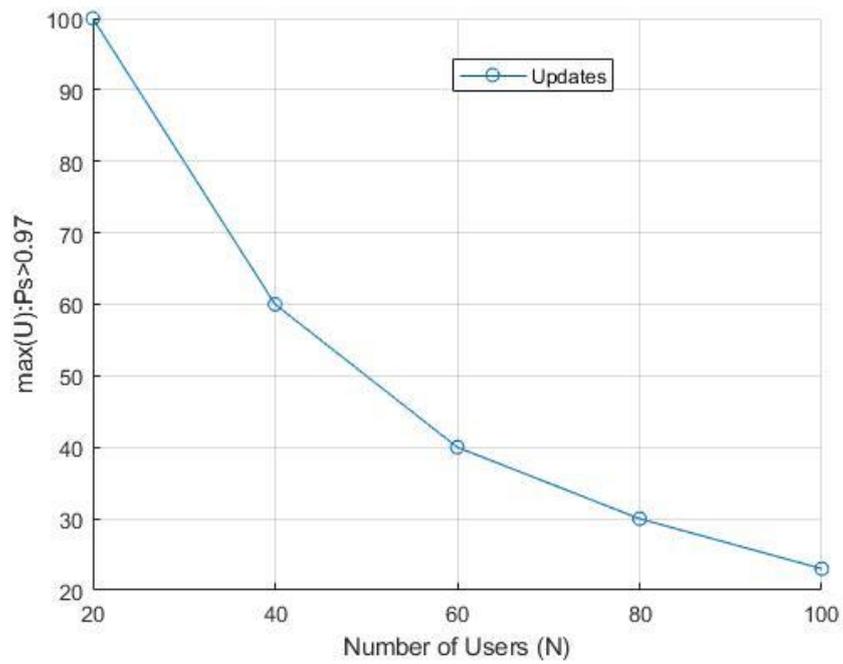


Figura 3.10 Máximo valor de  $U$  para  $P_s > 0,97$  vs.  $N$

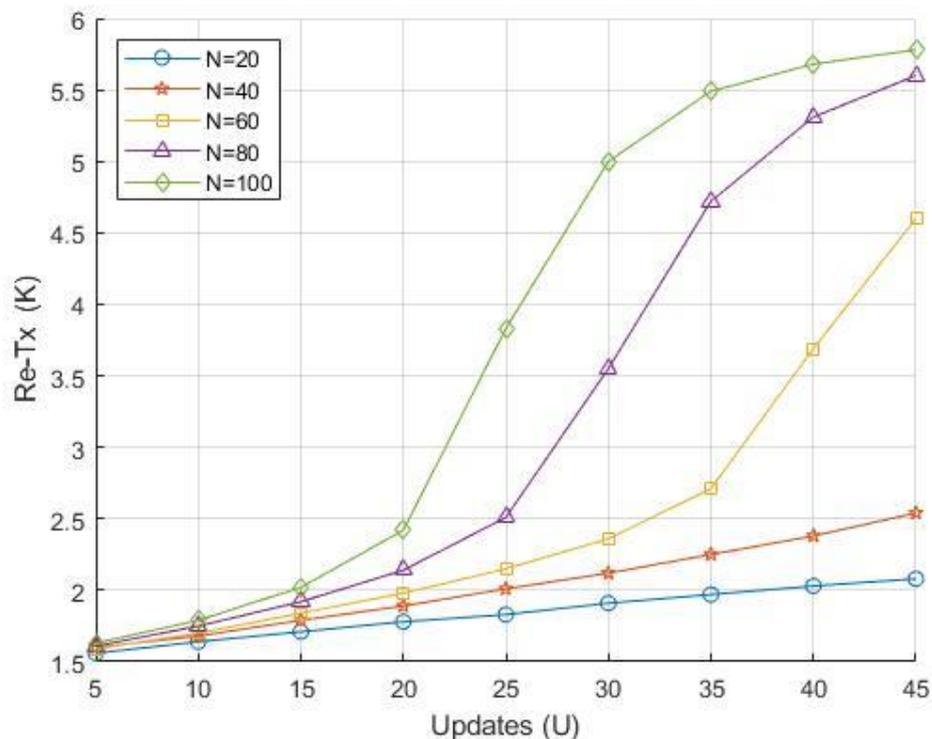
### 3.4 Evaluación del sistema con la función de coste considerando la métrica Aol, el número de actualizaciones por dispositivo y el número de retransmisiones de los dispositivos

Para evaluar el sistema con la función de coste y analizar el impacto de la métrica Aol, primeramente, se obtuvieron los resultados del número de retransmisiones de preámbulo ( $K$ ) que utilizan los dispositivos en diferentes escenarios, los cuales se muestran en la tabla 3.10. Se observa en el escenario con  $N=100$  y  $U=45$  que los UEs realizaban aproximadamente 6 retransmisiones de preámbulos, mientras que cuando  $N=20$  y  $U=45$ , las retransmisiones de preámbulos realizados son aproximadamente 2, dando a entender que a medida que se incrementa la carga en el sistema y el número de actualizaciones generadas, los dispositivos realizan más retransmisiones, lo que influye en los recursos energéticos utilizados.

**Tabla 3.10 Intentos de retransmisión por usuario vs. actualizaciones**

| U \ N | 5    | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   | 35   | 40   | 45   |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 20    | 1,56 | 1,64 | 1,71 | 1,78 | 1,83 | 1,91 | 1,97 | 2,03 | 2,08 |
| 40    | 1,60 | 1,68 | 1,79 | 1,89 | 2,01 | 2,12 | 2,25 | 2,38 | 2,54 |
| 60    | 1,59 | 1,70 | 1,84 | 1,98 | 2,15 | 2,36 | 2,71 | 3,69 | 4,60 |
| 80    | 1,61 | 1,75 | 1,92 | 2,14 | 2,51 | 3,55 | 4,72 | 5,31 | 5,60 |
| 100   | 1,63 | 1,79 | 2,02 | 2,42 | 3,83 | 5,00 | 5,49 | 5,68 | 5,78 |

En la figura 3.11 se representa el número de retransmisiones vs. el número de generación de actualizaciones por usuario. Analizando la curva de  $N=20$ , se visualiza que para valores de  $U < 35$ , los usuarios realizan entre 1 y 2 retransmisiones de preámbulos utilizando pocos recursos del sistema. A medida que el número de usuarios se incrementa en el sistema, el número de retransmisiones también se incrementa; esto se observa en la curva de  $N=100$ , los valores se incrementaron súbitamente de entre 2 a casi 6 retransmisiones de preámbulos para valores de  $U > 15$ , lo que implica el aumento de consumo energético de los dispositivos.

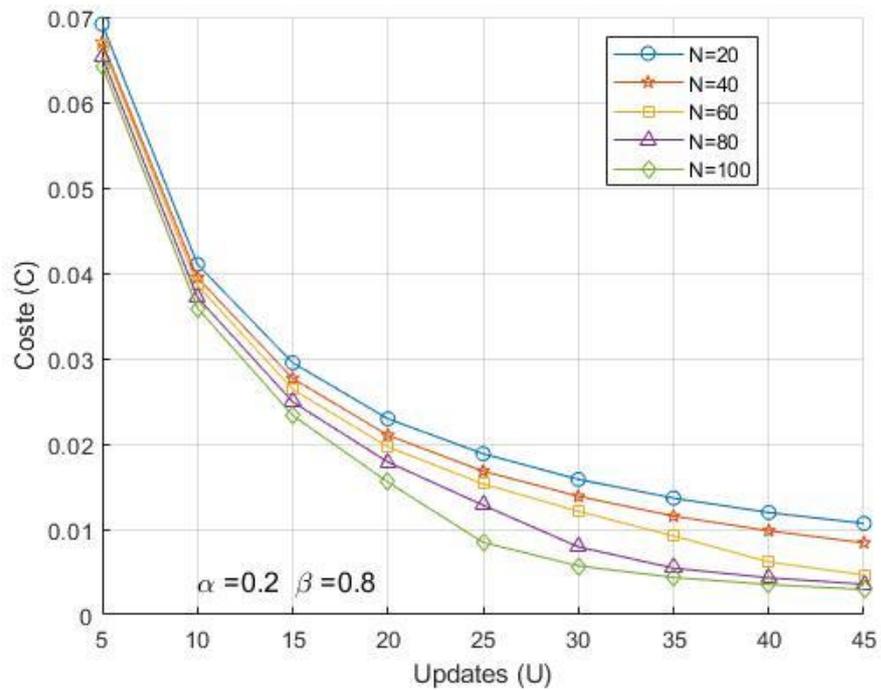


**Figura 3.11 Intentos de retransmisión por usuario vs. actualizaciones**

Para evaluar la función de coste planteada (ecuación 2.1) se tomó en consideración el patrón de actualización  $\phi_1$ , donde se establece el escenario con dispositivos sincronizados; también se presentan los resultados de los patrones  $\phi_2$  y *exponencial* en el apéndice A y B, respectivamente, los cuales tienen un comportamiento similar a los presentados en el siguiente análisis.

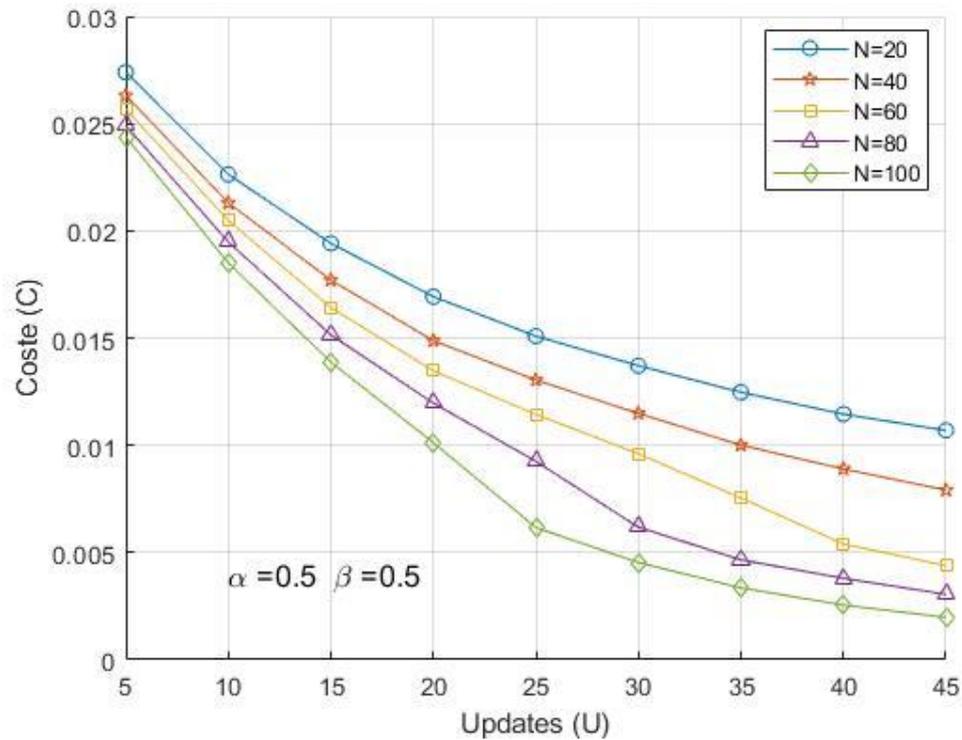
Se seleccionó el valor de Aol, el promedio de los intentos de transmisión K y el número de actualizaciones U por cada valor de N independientemente. Se consideraron tres escenarios: en el primero se da menor prioridad a la Aol con respecto al número de retransmisiones de preámbulo y generación de actualizaciones del dispositivo, en el segundo se da la misma prioridad a los dos componentes y en el tercero se da mayor prioridad a la Aol con respecto al número de retransmisiones de preámbulo y generación de actualizaciones del dispositivo.

En la figura 3.12 se visualizan los efectos de la función de coste en el primer escenario con los valores  $\alpha = 0.2$  y  $\beta = 0.8$ . En este caso específico, se prioriza con un 80% al número de intentos de retransmisiones con las actualizaciones y se desprecia la *AoI* a un 20%. Se observa que el consumo energético es racional, debido a que, a mayores retransmisiones directamente proporcionales a las actualizaciones, la curva desciende ya que la *AoI* en dicha aplicación no fue de alta prioridad.



**Figura 3.12 Función de coste con  $\alpha=0.2$  y  $\beta 0.8$**

En el segundo escenario, cuando los pesos de la función de coste son equilibrados tanto para  $\alpha = 0.5$  y  $\beta = 0.5$ , mostrado en la figura 3.13, la curva de la función de coste tiene un aceptable descenso debido al equilibrio entre la *AoI* con respecto a las actualizaciones y las retransmisiones del *Msg1*.



**Figura 3.13 Función de coste con  $\alpha=0.5$  y  $\beta 0.5$**

En la figura 3.14 se representan los resultados referentes al tercer escenario con  $\alpha = 0.8$  y  $\beta = 0.2$ . Se observa que, en general, el valor de la función de coste llega a un punto máximo y luego comienza a descender. Esto evidencia el impacto de la Aol en el rendimiento del sistema. Además, se observa que este punto máximo coincide con el instante en el que aumentar el número de actualizaciones que generan los usuarios, repercute en la frescura de la información. Por otro lado, el número de retransmisiones del Msg1 para tener acceso satisfactorio aumenta, lo cual implica un costo energético elevado del dispositivo debido a las retransmisiones de las actualizaciones.

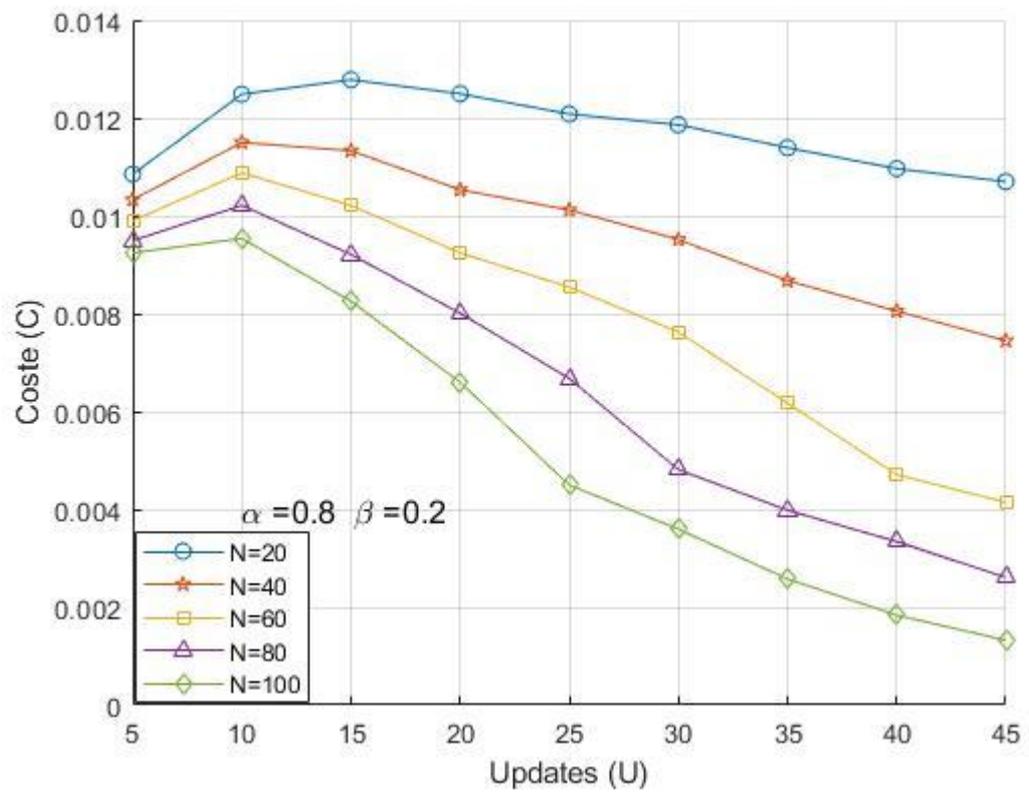


Figura 3.14 Función de coste con  $\alpha=0.8$  y  $\beta=0.2$

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El vertiginoso progreso de las telecomunicaciones ha redundado a que se interconecten exponencialmente más equipos a la red celular, tales como dispositivos operando de forma autónoma que no requieren la intervención humana para reportar eventos en una conexión ubicua, utilizados en la diversidad de aplicaciones y servicios en comunicaciones de tipo máquina (*Machine-Type Communications*, MTC).

Al presentarse un tráfico elevado de dispositivos MTC con el nuevo paradigma de Internet de las Cosas (*Internet of Things*, IoT), resulta un tráfico elevado en la red celular. En esas condiciones es importante nuevas métricas para el análisis de rendimiento en la red que permitan conocer el estado actual de un sistema.

La antigüedad de la información (Aol) es la métrica utilizada en esta investigación para comprobar el estado actual de un sistema. Mediante un modelo de simulación en Matlab se implementó un algoritmo que permite controlar las actualizaciones, descartando aquellas actualizaciones que no inciden en el sistema ya que existe una actualización más fresca del estado del sistema.

Se evaluó una red IoT celular en la que se implementaron cuatro escenarios de generación de actualizaciones: uniforme, exponencial,  $\phi_1$  y  $\phi_2$ . En cada escenario se obtuvo la media temporal considerando el máximo valor de Aol en cada caso y también el promedio, ya que el valor mínimo no es siempre un escenario real pues siempre existe una holgura para que no se encuentre mayor error en la métrica.

Se definió una función de coste para evaluar el sistema y el impacto de la métrica Aol. Esta función de coste también considera el número de actualizaciones y número de retransmisiones, asignando a cada uno de estos factores un peso para compensar su estabilidad acorde a la carga del sistema.

## Conclusiones

Se modeló el canal de acceso aleatorio en redes IoT celular en condiciones reales para tráfico H2H y diversas configuraciones de tráfico MTC. El número de usuarios tomados en cuenta para la evaluación estaban entre  $N=20$  hasta  $N=100$  en intervalos de 20 y las actualizaciones por segundo consideradas para la evaluación fueron desde  $U=5$  hasta  $U=45$  en incrementos de 5. El tiempo de simulación es de  $T=1$  minuto, por cada par de  $N$  vs.  $U$ .

Se estableció la métrica antigüedad de la información en la red de acceso radio a través de la media temporal en valor máximo y promedio, respectivamente. Para cada uno de los escenarios de comunicaciones masivas se establecieron los siguientes patrones de generación de actualizaciones: uniforme, exponencial,  $\phi_1$  y  $\phi_2$ .

Para el análisis en condiciones óptimas, se ajustó la cantidad de actualizaciones en los equipos UE, que corresponden a los dispositivos IoT y el número intentos de retransmisiones, con una tasa de probabilidad de acceso satisfactorio mayor a 0,97.

Se analizó el impacto de la Aol en el rendimiento del sistema con una función de costo considerando adicionalmente el número de actualizaciones generadas por los usuarios y el número de retransmisiones de los dispositivos. Se evaluaron tres escenarios: en el primer escenario se utiliza los valores de  $\alpha=0,2$  y  $\beta=0,8$  la tendencia de la curva ofrece mayor prioridad para el número de actualizaciones juntamente con el número de retransmisiones. Mientras que en el segundo escenario se evaluó con  $\alpha=0,5$  y  $\beta=0,5$  existió un equilibrio en la tendencia en la curva, pero la función de costo aumentó levemente. Para el caso  $\alpha=0.8$  y  $\beta=0.2$ , se tuvo un incremento considerable en la función de costo, esto evidencia el impacto de la métrica Aol para analizar el rendimiento del sistema.

La frecuencia de actualizaciones por parte de los dispositivos IoT demostró que la cantidad de actualizaciones por usuario  $U$  enviada al sistema, afecta a la Aol de

manera proporcional. Se logra minimizar la métrica mencionada al aumentar el valor de  $U$ ; sin embargo, llegando a un punto el canal se satura y el rendimiento mengua repercutiendo que la BS reciba actualizaciones retrasadas, producto de aquello la información de estado es desactualizada. Dicha información obsoleta no solamente desperdicia el ancho de banda, sino que puede tener consecuencias desastrosas para un sistema de misión crítica, por ejemplo.

### **Recomendaciones**

Debido a la inconstante carga que introducen los dispositivos IoT al canal de acceso radio, se recomienda como línea futura de investigación crear un mecanismo adaptativo que permita ajustar dinámicamente la tasa de generación de actualizaciones de modo que se minimice tanto la Aol como el número retransmisiones de los dispositivos. De esta forma el sistema autónomamente puede tomar la mejor decisión en cuanto a balancear la carga del sistema cuando exista congestión en la red.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Kosta, N. Pappas, and V. Angelakis, "Age of Information: A New Concept, Metric, and Tool," *Age of Information: A New Concept, Metric, and Tool*, 2017, doi: 10.1561/9781680833614.
- [2] J. Vidal, L. Tello-Oquendo, V. Pla, and L. Guijarro, "Performance Study and Enhancement of Access Barring for Massive Machine-Type Communications," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 63745–63759, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2917618.
- [3] K. Chen and L. Huang, "Age-of-information in the presence of error," *IEEE International Symposium on Information Theory - Proceedings*, vol. 2016-Augus, pp. 2579–2583, 2016, doi: 10.1109/ISIT.2016.7541765.
- [4] D. Pacheco-Paramo and L. Tello Oquendo, "Delay-aware dynamic access control for mMTC in wireless networks using deep reinforcement learning," *Computer Networks*, vol. 182, p. 107493, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.comnet.2020.107493.
- [5] S. Kaul, M. Gruteser, V. Rai, and J. Kenney, "Minimizing age of information in vehicular networks," *2011 8th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, SECON 2011*, pp. 350–358, 2011, doi: 10.1109/SAHCN.2011.5984917.
- [6] V. Tikhvinskiy, E. Deviatkin, A. Aitmagambetov, and A. Kulakaeva, "Provision of IoT services for CO-Located 4G/5G networks utilisation with dynamic frequency sharing," *2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2020 - Proceedings*, 2020, doi: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261526.
- [7] A. Ghosh, A. Maeder, M. Baker, and D. Chandramouli, "5G Evolution: A View on 5G Cellular Technology Beyond 3GPP Release 15," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127639–127651, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2939938.
- [8] L. Tello-Oquendo *et al.*, "Performance Analysis and Optimal Access Class Barring Parameter Configuration in LTE-A Networks with Massive M2M Traffic," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pp. 1–1, 2017, doi: 10.1109/TVT.2017.2776868.
- [9] D. Pacheco-Paramo, L. Tello-Oquendo, V. Pla, and J. Martinez-Bauset, "Deep reinforcement learning mechanism for dynamic access control in wireless networks

- handling mMTC,” *Ad Hoc Networks*, vol. 94, 2019, doi: 10.1016/j.adhoc.2019.101939.
- [10] 3GPP, “TSG-RAN TS 36.300. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN),” vol. 0, p. Version 8.9.0, 2009.
- [11] P. D. Peter, Gaal; Robert. Fuchs; Yongbin, Wei; Ke, Liu; Hanfang and M. Malladi; Daniel, “Efficient zadoff-chu sequence generation,” US Patent 8,374,072., 2013
- [12] X. Zhang, *LTE Optimization Engineering Handbook*. 2017. doi: 10.1002/9781119158981.
- [13] A. Søråa, “A Machine Learning based Prediction Model for Bursty Traffic in 5G mMTC Networks,” p. 82, 2019.
- [14] I. Kadota and E. Modiano, “Minimizing the age of information in wireless networks with stochastic arrivals,” *Proceedings of the International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, pp. 221–230, 2019, doi: 10.1145/3323679.3326520.
- [15] L. Tello-Oquendo, V. Pla, I. Leyva-Mayorga, J. Martinez-Bauset, V. Casares-Giner, and L. Guijarro, “Efficient random access channel evaluation and load estimation in LTE-A with massive MTC,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 2, pp. 1998–2002, 2019, doi: 10.1109/TVT.2018.2885333.
- [16] D. Kim, W. Kim, and S. An, “Adaptive random access preamble split in LTE,” *2013 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, IWCMC 2013*, pp. 814–819, 2013, doi: 10.1109/IWCMC.2013.6583662.
- [17] S. Cherkaoui, I. Keskes, H. Rivano, and R. Stanica, “LTE-A random access channel capacity evaluation for M2M communications,” *IFIP Wireless Days*, vol. 2016-April, pp. 1–6, 2016, doi: 10.1109/WD.2016.7461480.
- [18] I. Kadota and E. Modiano, “Minimizing the Age of Information in Wireless Networks with Stochastic Arrivals,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 20, no. 3, pp. 1173–1185, 2021, doi: 10.1109/TMC.2019.2959774.
- [19] E. T. Ceran, D. Gunduz, and A. Gyorgy, “Average age of information with hybrid ARQ under a resource constraint,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 1900–1913, 2019, doi: 10.1109/TWC.2019.2899303.

- [20] A. Biral, M. Centenaro, A. Zanella, L. Vangelista, and M. Zorzi, “The challenges of M2M massive access in wireless cellular networks,” *Digital Communications and Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 1–19, 2015, doi: 10.1016/j.dcan.2015.02.001.
- [21] 3GPP, “Study on RAN Improvements for Machine-type Communications. Technical Specification (TS) 37.868,” p. Version 1.0.0., 2011.

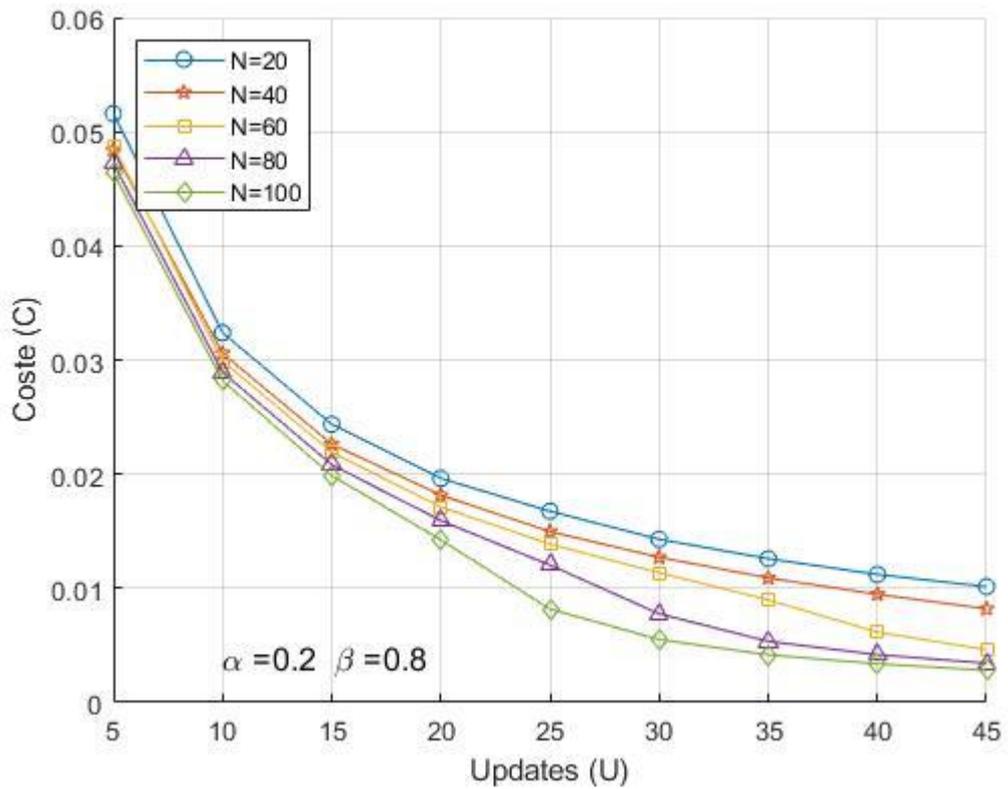
# APÉNDICES

## APÉNDICE A

Resultados de evaluar la función de coste con **phi2** max

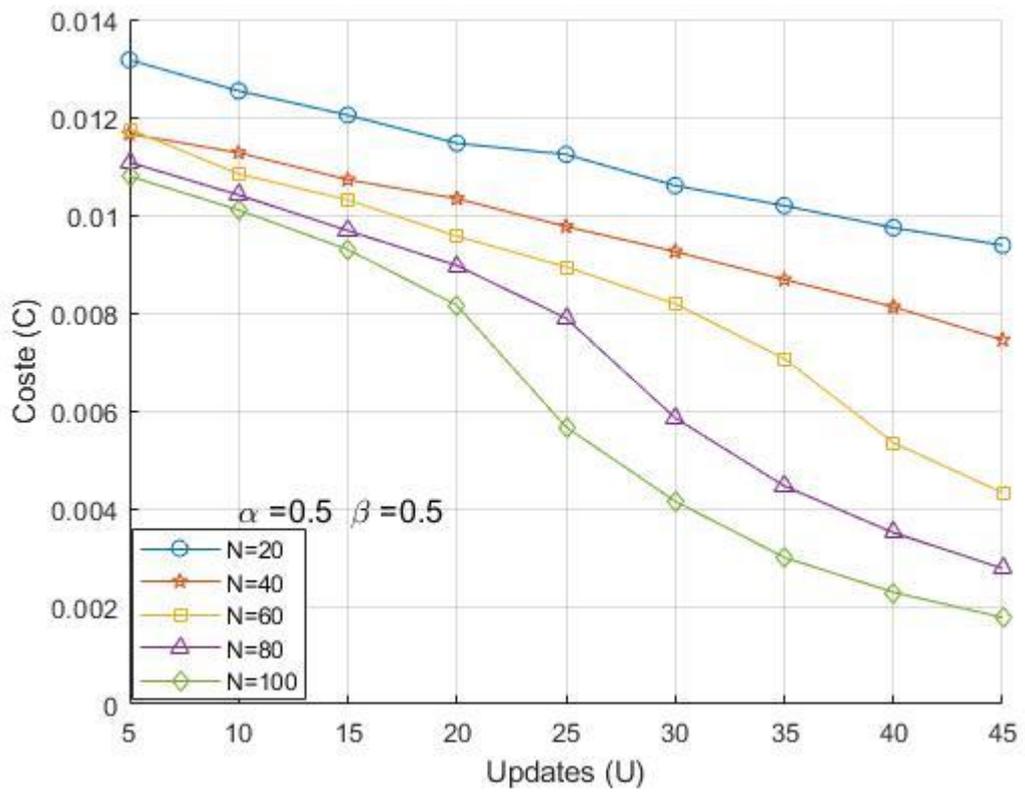
$\alpha=0,2 \beta=0,8$

| U \ N | 5      | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 20    | 0,0692 | 0,0410 | 0,0295 | 0,0229 | 0,0188 | 0,0158 | 0,0137 | 0,0120 | 0,0107 |
| 40    | 0,0670 | 0,0395 | 0,0277 | 0,0210 | 0,0168 | 0,0139 | 0,0115 | 0,0098 | 0,0084 |
| 60    | 0,0666 | 0,0386 | 0,0264 | 0,0196 | 0,0153 | 0,0121 | 0,0092 | 0,0062 | 0,0046 |
| 80    | 0,0653 | 0,0372 | 0,0249 | 0,0179 | 0,0128 | 0,0079 | 0,0055 | 0,0043 | 0,0036 |
| 100   | 0,0643 | 0,0359 | 0,0233 | 0,0155 | 0,0085 | 0,0057 | 0,0044 | 0,0035 | 0,0029 |



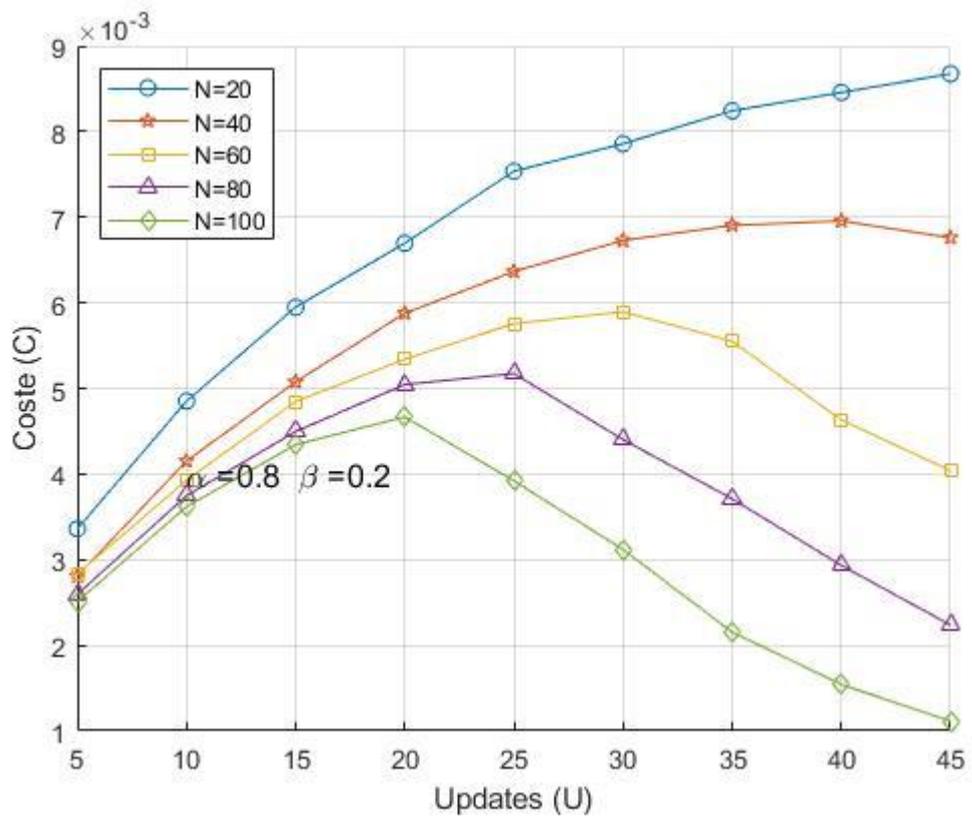
$\alpha=0,5 \beta=0,5$

| U \ N | 5      | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 20    | 0,0274 | 0,0226 | 0,0194 | 0,0169 | 0,0151 | 0,0137 | 0,0125 | 0,0115 | 0,0107 |
| 40    | 0,0263 | 0,0213 | 0,0177 | 0,0149 | 0,0130 | 0,0115 | 0,0100 | 0,0089 | 0,0079 |
| 60    | 0,0257 | 0,0205 | 0,0164 | 0,0135 | 0,0114 | 0,0096 | 0,0075 | 0,0054 | 0,0044 |
| 80    | 0,0249 | 0,0195 | 0,0151 | 0,0120 | 0,0093 | 0,0062 | 0,0047 | 0,0038 | 0,0031 |
| 100   | 0,0244 | 0,0185 | 0,0139 | 0,0101 | 0,0062 | 0,0045 | 0,0034 | 0,0025 | 0,0020 |



$\alpha=0,8 \quad \beta=0,2$

| $\frac{U}{N}$ | 5      | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 20            | 0,0109 | 0,0125 | 0,0128 | 0,0125 | 0,0121 | 0,0119 | 0,0114 | 0,0110 | 0,0107 |
| 40            | 0,0103 | 0,0115 | 0,0113 | 0,0105 | 0,0101 | 0,0095 | 0,0087 | 0,0081 | 0,0074 |
| 60            | 0,0099 | 0,0109 | 0,0102 | 0,0092 | 0,0085 | 0,0076 | 0,0062 | 0,0047 | 0,0041 |
| 80            | 0,0095 | 0,0102 | 0,0092 | 0,0080 | 0,0067 | 0,0048 | 0,0040 | 0,0033 | 0,0026 |
| 100           | 0,0092 | 0,0095 | 0,0083 | 0,0066 | 0,0045 | 0,0036 | 0,0026 | 0,0018 | 0,0013 |

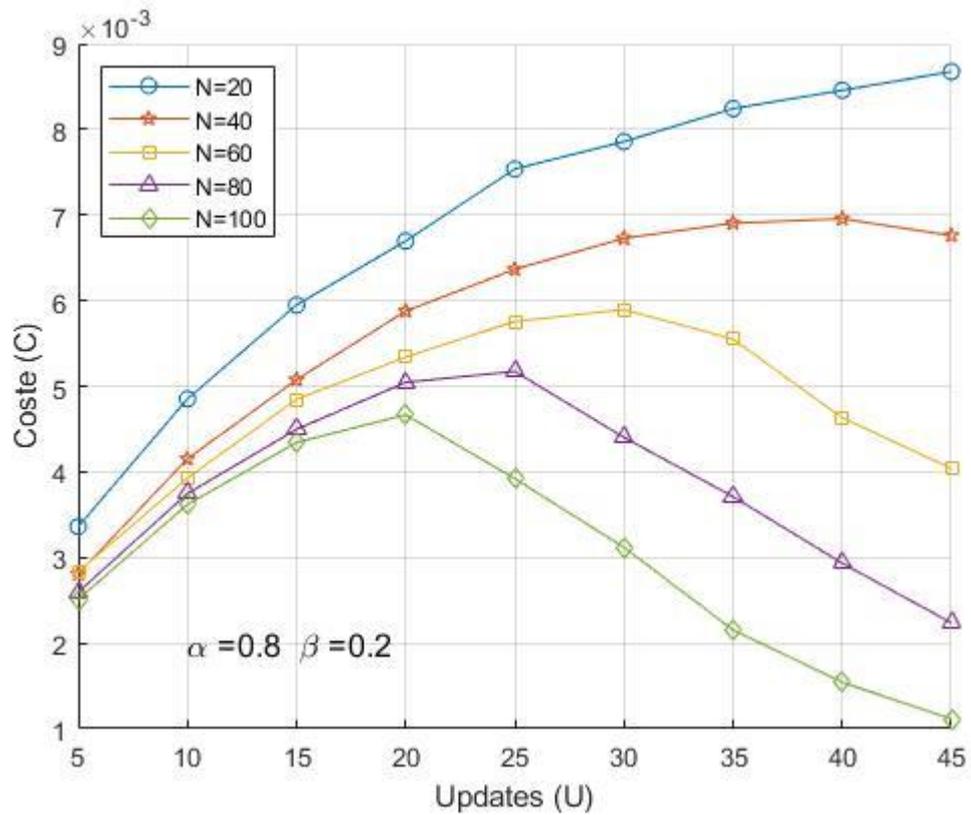


## APÉNDICE B

Resultados de evaluar la función de coste con **exponencial max**

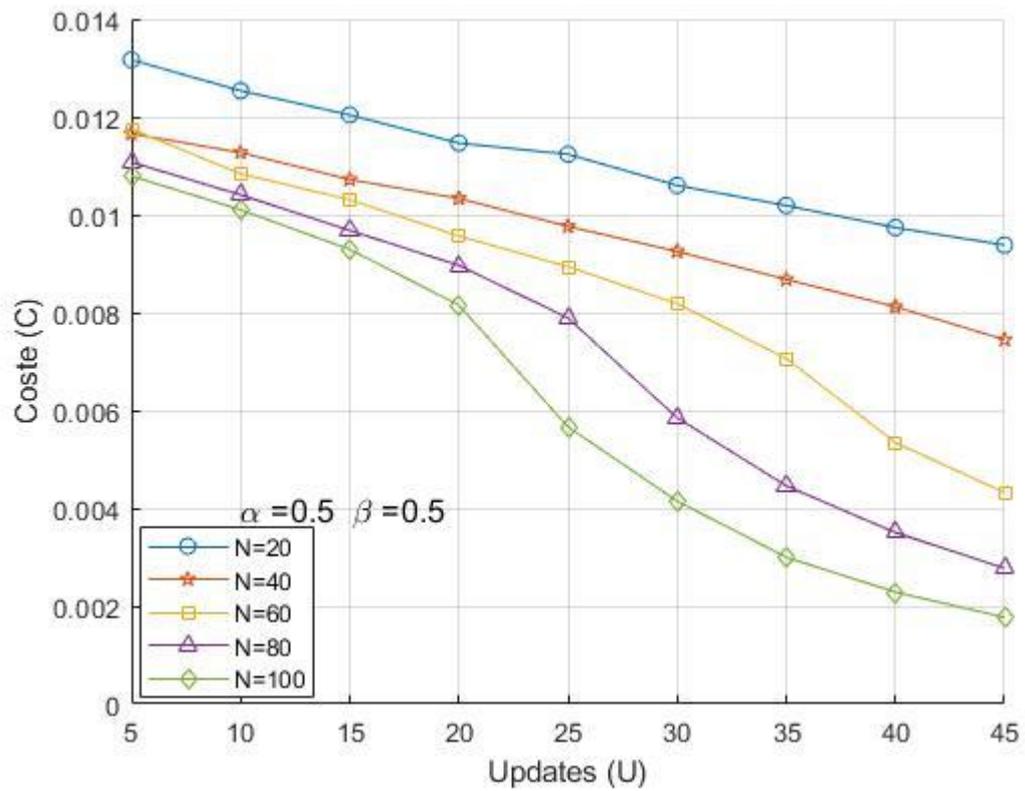
$$\alpha=0,2 \quad \beta=0,8$$

| U \ N | 5      | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 20    | 0,0692 | 0,0410 | 0,0295 | 0,0229 | 0,0188 | 0,0158 | 0,0137 | 0,0120 | 0,0107 |
| 40    | 0,0670 | 0,0395 | 0,0277 | 0,0210 | 0,0168 | 0,0139 | 0,0115 | 0,0098 | 0,0084 |
| 60    | 0,0666 | 0,0386 | 0,0264 | 0,0196 | 0,0153 | 0,0121 | 0,0092 | 0,0062 | 0,0046 |
| 80    | 0,0653 | 0,0372 | 0,0249 | 0,0179 | 0,0128 | 0,0079 | 0,0055 | 0,0043 | 0,0036 |
| 100   | 0,0643 | 0,0359 | 0,0233 | 0,0155 | 0,0085 | 0,0057 | 0,0044 | 0,0035 | 0,0029 |



$\alpha=0,5$   $\beta=0,5$

| $\frac{U}{N}$ | 5      | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 20            | 0,0274 | 0,0226 | 0,0194 | 0,0169 | 0,0151 | 0,0137 | 0,0125 | 0,0115 | 0,0107 |
| 40            | 0,0263 | 0,0213 | 0,0177 | 0,0149 | 0,0130 | 0,0115 | 0,0100 | 0,0089 | 0,0079 |
| 60            | 0,0257 | 0,0205 | 0,0164 | 0,0135 | 0,0114 | 0,0096 | 0,0075 | 0,0054 | 0,0044 |
| 80            | 0,0249 | 0,0195 | 0,0151 | 0,0120 | 0,0093 | 0,0062 | 0,0047 | 0,0038 | 0,0031 |
| 100           | 0,0244 | 0,0185 | 0,0139 | 0,0101 | 0,0062 | 0,0045 | 0,0034 | 0,0025 | 0,0020 |



$\alpha=0,8$   $\beta=0,2$

| U \ N | 5      | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 20    | 0,0109 | 0,0125 | 0,0128 | 0,0125 | 0,0121 | 0,0119 | 0,0114 | 0,0110 | 0,0107 |
| 40    | 0,0103 | 0,0115 | 0,0113 | 0,0105 | 0,0101 | 0,0095 | 0,0087 | 0,0081 | 0,0074 |
| 60    | 0,0099 | 0,0109 | 0,0102 | 0,0092 | 0,0085 | 0,0076 | 0,0062 | 0,0047 | 0,0041 |
| 80    | 0,0095 | 0,0102 | 0,0092 | 0,0080 | 0,0067 | 0,0048 | 0,0040 | 0,0033 | 0,0026 |
| 100   | 0,0092 | 0,0095 | 0,0083 | 0,0066 | 0,0045 | 0,0036 | 0,0026 | 0,0018 | 0,0013 |

