



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dept. of Communications

Analysis of the Age of Information in IoT networks with
hybrid multiple access control protocols

Master's Thesis

Master of Science in Telecommunication Technologies, Systems
and Networks

AUTHOR: Guerra Barba, Joel Alejandro

Tutor: Pla Boscà, Vicent

External cotutor: Tello Oquendo, Luis Patricio

ACADEMIC YEAR: 2023/2024

Objetivos – Analizar el impacto que tienen diferentes protocolos de control de acceso al medio (MAC) híbridos sobre la Edad de la Información (AoI, por sus siglas en inglés). En particular, se desarrolla un modelo de simulación de dos protocolos híbridos de acceso múltiple, ZMAC y EZMAC, con el fin de estudiar exhaustivamente su desempeño y caracterizar la AoI, así como sus cotas inferior y superior.

Metodología – Para llevar a cabo el análisis, se desarrolló un modelo de simulación para los protocolos ZMAC y EZMAC en redes inalámbricas de sensores. Se definió la métrica AoI como indicador del rendimiento de la red bajo diferentes escenarios y un patrón de tráfico simétrico. El trabajo comenzó con una revisión bibliográfica sobre redes de sensores y protocolos de acceso múltiple híbridos, así como sobre la métrica AoI, para su formulación. Posteriormente, se diseñaron y codificaron los escenarios de simulación, en los cuales se realizaron múltiples pruebas variando los parámetros de configuración para observar el rendimiento y la eficiencia de la red en términos de la AoI.

Desarrollos teóricos realizados – La Edad de la Información (AoI) es una métrica que mide el tiempo que ha pasado desde que se generó un paquete hasta que es recibido por una entidad central. Cada vez que el nodo de destino recibe un nuevo paquete, la AoI se reinicia y su valor refleja el tiempo transcurrido desde que se creó ese paquete. En cambio, si no se reciben paquetes nuevos, la AoI sigue aumentando con el paso del tiempo. En este trabajo, se realizó un análisis teórico para calcular esta métrica en redes de sensores con diversos protocolos de control de acceso al medio. Se derivaron fórmulas que consideran los tiempos en que se genera y recibe la información (paquetes por parte de los usuarios). Esto permite estimar el comportamiento de la AoI en diferentes escenarios y configuraciones de la red. Además se determinaron las cotas superior e inferior de la métrica para caracterizarla en diversos escenarios.

Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio – Se desarrolló un entorno de simulación el que se implementaron los protocolos ZMAC y EZMAC, adaptados para redes inalámbricas de sensores. Los prototipos fueron diseñados para replicar condiciones de red realistas, donde se probaron múltiples configuraciones de tráfico y parámetros de red. Las simulaciones se llevaron a cabo utilizando software especializado en modelado de redes y se realizaron diversas pruebas variando el número de nodos, las tasas de generación de datos y los protocolos de acceso al medio.

Resultados – Los resultados de las simulaciones muestran que, en distintos escenarios

de red y utilizando diferentes tasas de generación de tráfico, el protocolo híbrido ZMAC ofrece un rendimiento más consistente en términos de Edad Promedio de la Información (AAoI) en comparación con EZMAC. ZMAC demuestra ser más eficaz en la gestión de las actualizaciones de información, manteniendo una AAoI más baja y estable, especialmente en redes con alta carga de tráfico. Por su parte, aunque EZMAC introduce mejoras en la asignación de acceso al canal, en ciertos escenarios presenta un aumento de la AAoI debido a su estrategia de reserva de ranuras para sensores no propietarios.

Líneas futuras – Como posibles líneas de investigación futura, se sugiere el desarrollo de protocolos MAC descentralizados mejorados, con especial énfasis en su aplicabilidad en escenarios asimétricos. Además, se plantea la exploración de su rendimiento en redes de múltiples saltos, donde la latencia y la congestión representan desafíos críticos. También se pretende utilizar machine learning para ajustar los parámetros de la red y mejorar su rendimiento en términos de AoI. La investigación en estos ámbitos será fundamental para optimizar la eficiencia de la AoI en redes de sensores más complejas y con mayores restricciones de recursos.

Abstract – The Age of Information (AoI) concept was introduced as a metric to quantify the timeliness of information. AoI has demonstrated its relevance in remote estimation, as well as other scenarios requiring fast information updates. Its value varies with time and is defined as the time elapsed since the generation instant (at the remote sensor) of the most recent information update successfully received at the data collection station. On the other hand, multiple access (MAC) protocols play a crucial role in Internet of Things (IoT) network protocol stacks. Choosing an appropriate MAC protocol is essential to guaranteeing that sensor networks fulfill quality of service criteria regarding throughput, latency, data freshness, and ultimately the quality of information updates and insights provided at a central data collection station. The objective of this thesis is to examine the impact that different MAC protocols have on the AoI. More specifically, we will develop a simulation model of several hybrid MAC protocols and conduct an extensive simulation study to assess their performance using different AoI metrics (e.g., upper bound, lower bound or average values).

Autor: Joel Guerra Barba, [email: jguebar@upv.edu.es](mailto:jguebar@upv.edu.es)

Director 1: Vicent Pla Boscà, [email: vpla@upv.es](mailto:vpla@upv.es)

Director 2: Dr. Luis Tello Oquendo, Profesor Titular, Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador, [email: lptelloq@ieee.org](mailto:lptelloq@ieee.org)

Fecha de entrega: 04-09-2024

LISTA DE ACRÓNIMOS

Acronym	Definition
AoI	Age of Information
WSN	Wireless Sensor Networks
MAC	Medium Access Control
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
TDMA	Time Division Multiple Access
ZMAC	Hybrid multiple access protocol based on CSMA/TDMA
EZMAC	Simplified multiple access protocol for sensor networks
AAoI	Average Age of Information
IoT	Internet of Things
IID	Independent and Identically Distributed

LISTA DE FIGURAS –

Índice de figuras

1.	Red de Sensores N , transmitiendo a la Estación Base.	10
2.	Diagrama Procedimiento de Acceso Aleatorio [18]	11
3.	Age of Information [14]	14
4.	Esquema sobre la diferencia entre enviar paquetes con regularidad y rendimiento mínimo [8]	15
5.	Diagrama de Bloques del Funcionamiento de los Protocolos ZMAC y EZMAC en Redes de Sensores Inalámbricos.	24
6.	Curvas de AAoI simuladas para un protocolo de control de acceso múltiple híbrido con $N = 10$ en función de la tasa de llegada λ_n . Se incluyen las cotas superior e inferior, junto con una aproximación teórica. La curva de simulación muestra los resultados con el modelo codificado en MATLAB.	26
7.	Curvas de AAoI simuladas para un protocolo de control de acceso múltiple híbrido con $N = 25$ en función de la tasa de llegada λ_n . Se incluyen las cotas superior e inferior, junto con una aproximación teórica. La curva de simulación muestra los resultados con el modelo codificado en MATLAB.	26
8.	Análisis comparativo del Average Age of Information (AAoI) en un sistema de control de acceso múltiple híbrido para $N = 10$, con tasas de llegada específicas $\lambda_n = 0,2$ y $\lambda_n = 0,5$. Las curvas presentadas incluyen las cotas analíticas superior e inferior, junto con una aproximación teórica y los resultados de simulación.	27
9.	Análisis comparativo del Average Age of Information (AAoI) en un sistema de control de acceso múltiple híbrido para $N = 25$, con tasas de llegada específicas $\lambda_n = 0,2$ y $\lambda_n = 0,5$. Las curvas presentadas incluyen las cotas analíticas superior e inferior, junto con una aproximación teórica y los resultados de simulación.	27
10.	Average Age of Information (AAoI) en función del número de sensores N para dos tasas de llegada $\lambda_n = 0,2$ y $\lambda_n = 0,5$ en un sistema de acceso múltiple híbrido. Se presentan las cotas analíticas superior e inferior, junto con una aproximación teórica y los resultados de simulación. Las curvas para $\lambda_n = 0,2$ se muestran como líneas sólidas, mientras que las correspondientes a $\lambda_n = 0,5$ se representan con líneas punteadas. Este análisis revela cómo el AAoI varía con N bajo diferentes condiciones de carga, destacando la precisión de la aproximación teórica en la estimación del comportamiento del sistema.	28
11.	Comparación de la Edad Promedio de la Información (AAoI) simulada para los protocolos ZMAC y EZMAC bajo un escenario simétrico, en el que todos los sensores tienen la misma tasa de llegada λ_n . Los resultados se presentan para $N = 10$	29

Índice

1. Introducción	6
2. Marco Teórico	8
2.1. Estado del arte	8
2.2. Redes de Sensores y Protocolos de Acceso Múltiple	9
2.3. Procedimiento de Acceso Aleatorio	10
2.4. Protocolos MAC	12
2.4.1. Z-MAC	12
2.4.2. EZMAC	12
2.5. Age of Information (AoI)	13
2.5.1. Definición	14
2.6. Media temporal	16
3. Metodología	17
3.1. Modelo del Sistema	17
3.1.1. Red y sus componentes	17
3.1.2. Patrón de Tráfico	17
3.1.3. Protocolos	18
3.1.4. AAoI	18
3.1.5. Escenarios	18
3.2. Protocolo ZMAC	19
3.3. Protocolo EZMAC	20
3.3.1. Diferencias clave entre ZMAC y EZMAC	22
3.4. Comportamiento de la AoI frente a cada Protocolo	23
3.4.1. Comportamiento del Protocolo EZMAC	23
3.5. Impacto del AoI en los protocolos ZMAC y EZMAC	24
4. Resultados	26
5. Conclusiones	29

1. Introducción

En la última década, el avance tecnológico ha provocado un aumento notable en el número de dispositivos conectados en red que se interconectan diariamente. Así, diversos dispositivos que operan de manera autónoma, sin requerir interacción humana, permiten una conexión ubicua con múltiples propósitos y para diversas aplicaciones y servicios.

El presente documento se centra en la evaluación de la edad promedio de la información (AAoI) en redes inalámbricas de un solo salto que utilizan un protocolo de acceso múltiple híbrido (MAC). Este análisis es crucial en el contexto de las redes de sensores, donde la frescura de los datos es fundamental para aplicaciones como la estimación remota.

Los protocolos de acceso múltiple (MAC) son elementos esenciales en las pilas de protocolos de las redes de sensores. La correcta selección de un protocolo MAC asegura que las redes de sensores puedan cumplir con los requisitos de calidad de servicio en términos de rendimiento, latencia y frescura de los datos. La edad de la información (AoI) es una métrica que mide la frescura de los datos, especialmente importante en aplicaciones que requieren actualizaciones frecuentes y oportunas.

Las métricas de rendimiento tradicionales utilizadas en las redes de comunicaciones no son adecuadas para caracterizar la puntualidad de las actualizaciones de estado en un sistema. Por esta razón, se ha introducido recientemente una nueva métrica llamada antigüedad de la información (Age of Information, AoI) [11]. AoI se propuso como una métrica innovadora que refleja la frecuencia con la que un sistema recibe actualizaciones sobre un proceso observado de forma remota. A diferencia de las métricas de rendimiento comunes, como el retardo o el throughput, AoI combina la latencia en la transmisión de actualizaciones y la velocidad a la que se entregan. En general, controlar solo una de estas métricas no es suficiente para lograr un buen rendimiento en términos de AoI.

El protocolo MAC híbrido analizado en este estudio combina las mejores características del acceso aleatorio y el acceso dedicado al canal dependiendo de la carga de la red. Estos protocolos, como ZMAC, se adaptan automáticamente a las condiciones de carga del canal, funcionando como acceso múltiple por detección de portadora (CSMA) en cargas bajas y como acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) en cargas altas.

Para abordar la problemática, se derivan límites superiores e inferiores para la AAoI en un protocolo MAC híbrido similar a ZMAC para redes de un solo salto. Además, se obtiene una aproximación para la AAoI en este protocolo. La AAoI obtenida analíticamente se compara con simulaciones para escenarios simétricos (donde todos los sensores tienen la misma tasa de llegada). Asimismo, se compara el rendimiento de la AAoI del protocolo MAC híbrido con el de EZMAC y una política centralizada, demostrando que, en escenarios simétricos, el rendimiento del MAC híbrido es comparable al de la política centralizada tanto en tasas de llegada bajas como altas.

El presente documento consta de cuatro capítulos, incluida la presente introducción. El capítulo 2 presenta el marco teórico donde se desarrollan brevemente los conceptos básicos referentes a redes de sensores, procedimiento de acceso aleatorio y la definición de

la métrica AoI; dichos conocimientos son necesarios para la elaboración del simulador y los escenarios planteados. Además, se realiza un análisis de estado del arte respecto a AoI y los diferentes enfoques que se han realizado hasta el momento. Se presenta el modelo del sistema, las configuraciones generales y la explicación del funcionamiento del simulador y los escenarios planteados para las pruebas realizadas. En el capítulo 3 se describe los protocolos utilizados y el comportamiento de la AoI. Finalmente en el capítulo 4 se presenta los resultados obtenidos de cada escenario evaluado y se analiza el comportamiento de estos. Finalmente, se realiza las respectivas conclusiones de la investigación y las proyecciones de trabajo futuro.

2. Marco Teórico

2.1. Estado del arte

Continuamente se realizan investigaciones dirigidas a redes de baja latencia. El Internet de las Cosas (IoT) ha revolucionado la forma en que interactuamos con el mundo digital, permitiendo que dispositivos sean identificados y gestionados remotamente a través de Internet. Este concepto ha crecido exponencialmente con la incorporación de dispositivos de bajo costo y fácil implementación, como las redes de sensores inalámbricos (WSN) [3], utilizadas en el seguimiento de la temperatura y la contaminación del aire [1], vehículos autónomos [4], Internet de las cosas (IoT) [15], entre otras.

En los estudios realizados por [5] y [6], se analizó el problema de la antigüedad de la información desde el punto de vista de la red. Por otro lado, en el trabajo de [16], se exploraron métodos óptimos para gestionar la frescura de la información en las comunicaciones utilizando la métrica de Edad de la Información (AoI).

En estudios como los de [10], se investigó el problema de la antigüedad de la información desde la perspectiva de red, explorando formas óptimas de gestionar la frescura de la información en las comunicaciones [18]. Esta métrica es crucial para aplicaciones que requieren información actualizada en tiempo real.

Investigaciones adicionales como [7] presentan una red de transmisión inalámbrica con muchos usuarios, donde solo se puede atender a un usuario a la vez, y en [18] han presentado redes de transmisión inalámbrica con muchos usuarios, donde se introduce un umbral de edad como una decisión óptima para minimizar AoI. Además, se han desarrollado nuevos algoritmos de programación basados en la edad, combinando la edad con los tiempos de llegada de los paquetes para optimizar las métricas de rendimiento a largo plazo.

En [18], los protocolos MAC híbridos, como Z-MAC y EZMAC, combinan características de acceso aleatorio y acceso dedicado al canal, adaptándose dinámicamente a la carga de la red para optimizar la frescura de los datos. Estos protocolos muestran una robustez significativa ante errores de sincronización y ofrecen un equilibrio entre el acceso aleatorio y el programado, optimizando el rendimiento en diversas condiciones de red.

Todos los estudios mencionados anteriormente han proporcionado a la academia conocimientos esenciales sobre la métrica AoI. Independientemente de su enfoque, el objetivo común es minimizar AoI para asegurar que la información presentada esté lo más actualizada posible en relación con las actualizaciones en diversos sistemas.

La contribución de este trabajo se centra en la evaluación de la métrica de Edad de la Información (AoI) en redes IoT utilizando protocolos híbridos MAC. Se analiza el desempeño de estos protocolos en diferentes escenarios, enfocados en la minimización de AoI para mantener la frescura de la información. Los dispositivos en estas redes generan actualizaciones con una frecuencia determinada, lo que implica un balance entre la capacidad del canal y la frecuencia de generación de actualizaciones. Si la capacidad del canal fuera

infinita, un mayor número de actualizaciones disminuiría la AoI; sin embargo, debido a las limitaciones del canal, un aumento en la frecuencia de actualizaciones incrementa la carga, resultando en mayores retrasos y posibles pérdidas, lo que incrementa la AoI. En este contexto, se ha desarrollado un entorno de simulación que replica el comportamiento de los protocolos híbridos MAC y un algoritmo de control de actualizaciones por dispositivo. Este algoritmo ajusta la frecuencia de las actualizaciones para optimizar la frescura de la información en el sistema, caracterizando el compromiso existente entre la frecuencia de envío de actualizaciones y la capacidad del canal.

2.2. Redes de Sensores y Protocolos de Acceso Múltiple

Las redes de sensores inalámbricas (WSN) son sistemas formados por numerosos sensores distribuidos espacialmente, los cuales monitorean y registran condiciones ambientales y transmiten la información recopilada a una estación central. Estas redes tienen aplicaciones en diversos campos, incluyendo el monitoreo ambiental, la salud, la agricultura y la industria.

Un componente crucial en el funcionamiento de las redes de sensores es el protocolo de acceso múltiple (MAC), que gestiona cómo los nodos sensores acceden al medio de comunicación compartido para evitar colisiones y asegurar una transmisión eficiente de datos. Los protocolos MAC pueden clasificarse en varias categorías, entre las que destacan el acceso múltiple por detección de portadora (CSMA) y el acceso múltiple por división de tiempo (TDMA). [18]

Las redes de sensores que se conectan a una estación base como podemos ver en la figura 1 son una parte esencial del modelo de red de salto único descrito en el presente estudio. En este contexto, varios sensores monitorean procesos de interés y generan paquetes de datos que son transmitidos a una estación central para aplicaciones de estimación remota. Cada sensor opera de manera independiente, generando paquetes de datos de acuerdo con un proceso de Bernoulli independiente y distribuido de manera idéntica (IID). Los datos generados se almacenan en el búfer de transmisión del sensor, y solo el último paquete recibido se mantiene para asegurar que la estación base trabaje con la información más actualizada posible. [13]

Las redes de sensores inalámbricos (WSN) juegan un papel crucial en el aumento de la ubicuidad de las redes con dispositivos inteligentes de bajo costo y fácil implementación. Las WSN pueden integrarse en el concepto del Internet de las Cosas (IoT). Esto permite nuevas experiencias en actividades cotidianas, como aplicaciones en hogares y oficinas, salud, vigilancia ambiental y ciudades inteligentes. En este sentido, las WSN permiten la comunicación entre dispositivos autónomos, recolectando y transmitiendo datos de manera eficiente con un mínimo consumo de energía, contribuyendo significativamente a la implementación del IoT. [3]

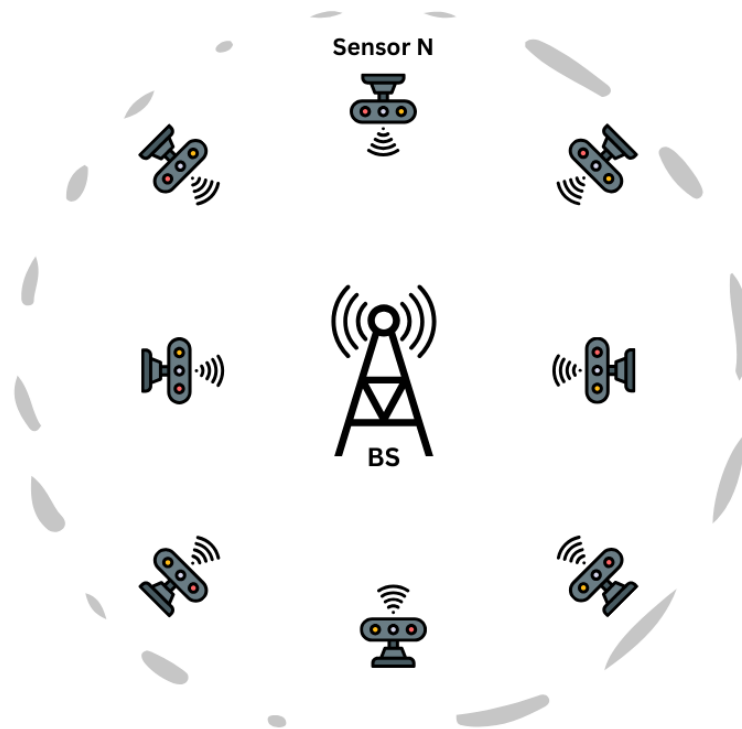


Figura 1: Red de Sensores N, transmitiendo a la Estación Base.

2.3. Procedimiento de Acceso Aleatorio

En esta sección, se revisará brevemente el Procedimiento de Acceso Aleatorio que es un método utilizado en redes de comunicación, especialmente en redes de sensores y sistemas de acceso múltiple, para gestionar cómo los dispositivos pueden acceder a un medio compartido de comunicación sin causar interferencias significativas entre ellos. Este procedimiento es crucial en redes donde múltiples dispositivos deben compartir un canal de comunicación, como en los protocolos MAC híbridos.

En el contexto del protocolo MAC híbrido, el Procedimiento de Acceso Aleatorio se implementa de la siguiente manera:

- **Asignación de Ranuras Dedicadas:** en el protocolo MAC híbrido, cada sensor tiene una ranura de tiempo dedicada dentro de una trama periódica. Esta ranura es exclusiva para el sensor, permitiéndole transmitir sin colisiones.
- **Ranuras Libres para Acceso Aleatorio:** si un sensor no utiliza su ranura dedicada en una trama, esta ranura queda libre y otros sensores pueden intentar acceder a ella mediante un procedimiento de acceso aleatorio. Este mecanismo es similar al

de los protocolos CSMA, donde los sensores compiten por el acceso al canal basado en la detección de portadora.

- Competencia y Prioridad:** Los sensores que desean transmitir en una ranura libre primero escuchan el canal para asegurarse de que esté libre. Si el canal está libre, los sensores pueden iniciar la transmisión. Si múltiples sensores intentan transmitir al mismo tiempo, puede ocurrir una colisión, lo que requiere la implementación de mecanismos de resolución de colisiones, como el backoff exponencial.
- Transmisión y Actualización:** una vez que un sensor logra acceder al canal, transmite su paquete de datos a la estación base. La estación base recibe la actualización y la procesa, asegurando que la información más reciente se almacene y utilice para aplicaciones de monitoreo y control.

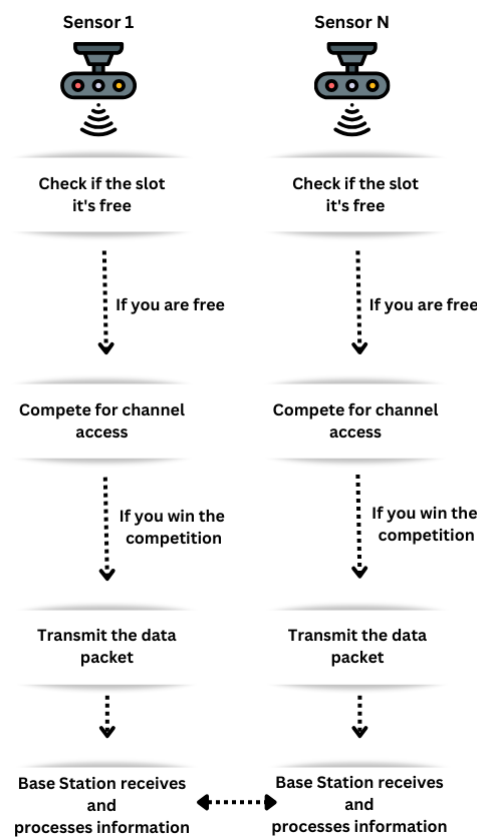


Figura 2: Diagrama Procedimiento de Acceso Aleatorio [18]

En la figura 2 muestra el flujo de cómo los sensores verifican si una ranura está libre, compiten por el acceso al canal y, si tienen éxito, transmiten su paquete de datos a la

estación base, que luego procesa la actualización. Este procedimiento es fundamental para asegurar que la información se mantenga actualizada y relevante en aplicaciones críticas.

2.4. Protocolos MAC

2.4.1. Z-MAC

Z-MAC es un protocolo MAC híbrido diseñado para redes de sensores inalámbricos que combina las ventajas de TDMA (Time Division Multiple Access) y CSMA (Carrier Sense Multiple Access). Este enfoque híbrido permite una alta utilización del canal y una baja latencia en condiciones de baja contención, mientras que asegura una alta utilización del canal y reduce las colisiones bajo alta contención [19]

Las características principales de Z-MAC son las siguientes:

- Adaptabilidad: Se adapta dinámicamente a las condiciones de contención de la red, funcionando como CSMA bajo baja contención y como TDMA bajo alta contención.
- Robustez: Es robusto frente a errores de sincronización y cambios en la topología de la red.
- Control de Contención Explícito (ECN): Utiliza mensajes de notificación explícita de contención para evitar colisiones ocultas y mejorar la eficiencia del canal [19].

Los estudios han demostrado que Z-MAC logra un equilibrio efectivo entre la eficiencia del canal y la latencia. En condiciones de baja contención, se comporta como CSMA, permitiendo una rápida transmisión de datos. Bajo alta contención, cambia a TDMA, asegurando que las transmisiones sean ordenadas y minimizando las colisiones. Esta dualidad permite que Z-MAC se adapte a diversos escenarios de red, manteniendo un rendimiento óptimo[19]

2.4.2. EZMAC

EZMAC es un protocolo de acceso múltiple (MAC) diseñado para redes de sensores inalámbricos. Se destaca por su simplicidad y eficiencia en el uso del canal, combinando características de acceso aleatorio y acceso programado para mejorar el rendimiento en diferentes condiciones de red. Las características de EZMAC son las siguiente:

- Simplicidad: EZMAC está diseñado para ser fácil de implementar, con un bajo costo computacional y de comunicación, lo que lo hace adecuado para dispositivos con recursos limitados.
- Adaptabilidad: El protocolo puede adaptarse dinámicamente a las condiciones cambiantes de la red, ajustando su comportamiento para optimizar el uso del canal y minimizar las colisiones.

- Bajo Consumo de Energía: EZMAC está optimizado para reducir el consumo de energía, lo cual es crucial en aplicaciones de redes de sensores donde los dispositivos a menudo funcionan con baterías.

EZMAC es un protocolo MAC híbrido diseñado para redes de sensores inalámbricos. Al igual que otros protocolos híbridos como ZMAC, EZMAC combina características de acceso aleatorio (CSMA) y acceso programado (TDMA) para mejorar la eficiencia del canal y reducir las colisiones en diversas condiciones de red [18].

Al combinar acceso aleatorio y programado, EZMAC optimiza el uso del canal bajo diferentes condiciones de red. La asignación de tiempos específicos para la transmisión ayuda a minimizar las colisiones, especialmente en entornos con alta densidad de nodos. Su capacidad de adaptación lo hace adecuado para una amplia gama de aplicaciones en redes de sensores inalámbricos.

Los estudios y evaluaciones han mostrado que EZMAC ofrece un buen equilibrio entre simplicidad, eficiencia del canal y bajo consumo de energía. Su rendimiento es comparable al de otros protocolos MAC híbridos, como Z-MAC, especialmente en términos de manejo de la contención y minimización de colisiones[18].

2.5. Age of Information (AoI)

La métrica conocida como Age of Information (AoI) ha sido introducida recientemente para medir la puntualidad de las actualizaciones de estado en los sistemas de comunicación. A diferencia de las métricas tradicionales como el retardo o el throughput, el AoI considera simultáneamente la latencia en la transmisión de las actualizaciones y la rapidez con la que estas son entregadas, ofreciendo así una evaluación más integral de la actualidad de la información en el sistema [18].

Una métrica propuesta recientemente que mide el tiempo desde la generación de la última actualización recibida es la AoI. Cada vez que el nodo receptor obtiene un nuevo paquete de actualización, la AoI se reduce al tiempo transcurrido desde la generación de ese paquete, mientras que en ausencia de nuevas actualizaciones, aumenta de manera lineal [7, 17].

En la figura 3 se puede observar la Edad de la Información (AoI) a lo largo del tiempo para un sistema donde se reciben actualizaciones en momentos específicos. Inicializa los vectores de tiempo y AoI, luego calcula la AoI en cada instante de tiempo incrementándola linealmente hasta que se recibe una actualización, momento en el cual la AoI se reinicia a cero. La gráfica resultante ilustra cómo la AoI aumenta de manera lineal entre actualizaciones y se restablece cuando se reciben nuevas actualizaciones, proporcionando una visualización clara del comportamiento de la frescura de la información en el sistema.

Debido al impacto que generaba, AoI se propuso como una nueva métrica que captura la frecuencia sobre actualizaciones de conocimiento que un sistema tiene sobre un proceso observado de forma remota. La necesidad y la importancia de caracterizar la frescura de la información, es importante lo cual nos brinda una gran variedad de sistemas de información, comunicación y control.

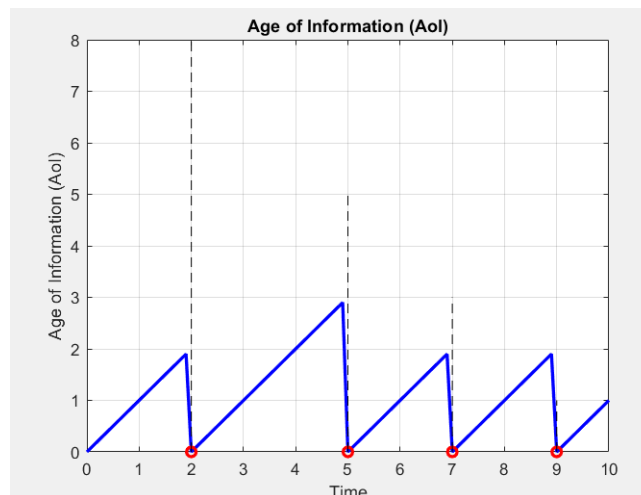


Figura 3: Age of Information [14]

Mantener baja la métrica de Age of Information (AoI) es esencial cuando se utiliza como herramienta para asegurar la actualización oportuna de la información, lo cual eventualmente mejora las métricas de rendimiento tradicionales en diversos contextos. Este concepto fue mencionado por primera vez en [9], donde se estudia en el contexto de las redes vehiculares y se investiga la problemática de la transmisión puntual de actualizaciones.

El desempeño óptimo de un sistema se logra cuando los paquetes con baja latencia se entregan de manera consistente. Sin embargo, existe una diferencia clara entre la entrega regular de paquetes y simplemente cumplir con el rendimiento mínimo, ya que este último puede lograrse incluso si hay largos periodos sin entregas. En la figura 4 se presentan dos escenarios diferentes donde las flechas anaranjadas indican ejemplos de secuencias de entrega de paquetes; ambos escenarios tienen el mismo rendimiento de tres paquetes en un intervalo de tiempo, pero difieren en la regularidad de las entregas. El segundo caso ilustra la falta de equilibrio en los intervalos entre entregas que se producen [8].

2.5.1. Definición

La Age of Information (AoI) mide el tiempo que ha pasado desde que se generó el último paquete que llegó correctamente a la estación central. La métrica Average Age of Information (AAoI) es el promedio de la AoI a lo largo del tiempo. Es una medida de la frescura de la información que llega a la estación central. Se calcula como el límite superior del promedio de la edad de la información en el tiempo dado por la siguiente expresión:

$$AAoI_n = \limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} A_n(t) \quad (1)$$

Aquí, $A_n(t)$ representa la AoI del sensor n en el instante t , y la AAoI es el promedio de esa AoI a lo largo del tiempo T .

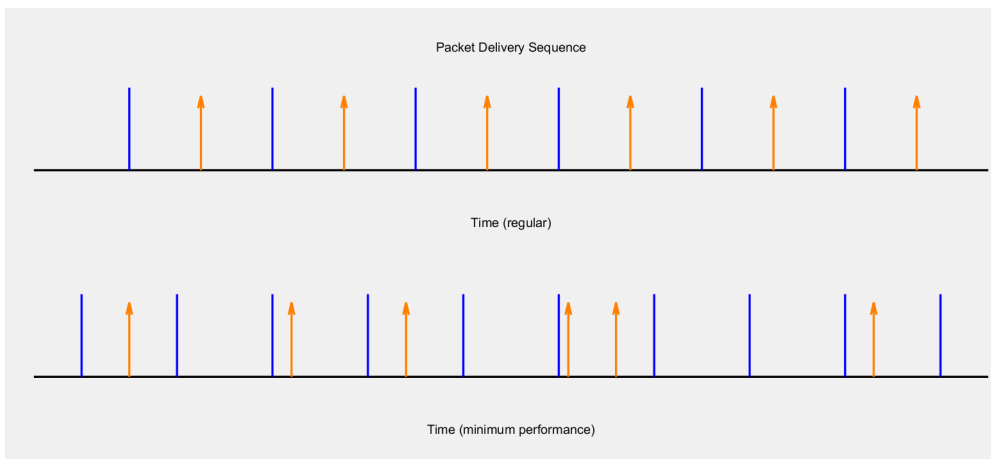


Figura 4: Esquema sobre la diferencia entre enviar paquetes con regularidad y rendimiento mínimo [8]

Entonces, la AoI de cada sensor cambia con el tiempo dependiendo de si el sensor transmite con éxito un nuevo paquete o no. La evolución de la AoI se define de la siguiente manera:

- Si el sensor no transmite en el tiempo t , la AoI aumenta en 1.
- Cuando un sensor logra transmitir un paquete con éxito, la AoI no simplemente se reinicia a cero. En su lugar, se actualiza basándose en la diferencia de tiempo entre el instante actual (es decir el tiempo en que se transmite el paquete) y el momento en que ese paquete fue generado originalmente y se calcula de la siguiente manera:

$$A_n(t+1) = \begin{cases} A_n(t) + 1 & \text{si } S_n(t) = 0, \\ (t+1 - R_m^n) & \text{si } S_n(t) = 1, \end{cases} \quad (2)$$

Aquí, $S_n(t)$ es una variable indicadora que toma el valor 1 si el sensor n transmite exitosamente en el tiempo t , y R_m^n representa el tiempo en que fue generado el paquete más reciente.

Es decir, cuando la AoI transmite con éxito se ajusta al tiempo que ha transcurrido desde que el paquete fue creado hasta que fue transmitido y recibido en la estación central. Este nuevo valor de AoI refleja cuánto tiempo estuvo “envejeciendo” la información antes de ser enviada con éxito. Por ejemplo, si un paquete fue generado en el tiempo t_0 y es transmitido con éxito en el tiempo t , la AoI se actualiza a $t - t_0$, que es la cantidad de tiempo que la información ha estado esperando para ser transmitida.

El límite inferior de la AAoI se calcula bajo la suposición de que cada sensor transmite sin interferencias. En este caso ideal, la AAoI está inversamente relacionada con la tasa de llegada de los paquetes λ_n al sensor. El límite inferior de la AAoI se expresa como:

$$AAoI_n \geq \frac{1}{\lambda_n}; \quad (3)$$

esto significa que la AAoI no puede ser más baja que el tiempo promedio que tarda en llegar un paquete nuevo al sensor, lo que establece un límite teórico inferior para la frescura de la información.

El límite superior de la AAoI considera el impacto de la contención por el canal entre múltiples sensores. Esta fórmula tiene en cuenta las probabilidades de éxito en las transmisiones p_s y cómo las colisiones y la contienda afectan la edad de la información. La expresión para el límite superior es:

$$AAoI_n \leq \frac{1 - (N + 1)(1 - \lambda_n)^N + N(1 - \lambda_n)^{N+1}}{\lambda_n p_s} + \frac{N(1 + p_s)}{2(1 - p_s)} - \frac{1}{2} \quad (4)$$

Donde $p_s = 1 - (1 - \lambda_n)^N$ y representa la probabilidad de éxito en la transmisión de un paquete por un sensor.

Este límite considera el comportamiento de los sensores en escenarios de alto tráfico, donde las colisiones y la asignación de ranuras tienen un impacto significativo en la AoI.

Dado que la exactitud en la determinación de la AAoI puede ser compleja, se usa una aproximación heurística para casos parcialmente simétricos, donde los sensores tienen la misma tasa de llegada. Esta aproximación está diseñada para simplificar el cálculo de la AAoI en estos escenarios. La fórmula de la aproximación es:

$$E \left[\frac{A_N(M - 1) + N(M - 1)(N(M - 1) - 1)/2 + (A + (M - 1)N)Z + Z(Z - 1)/2 + A'(A' - 1)/2}{NEM} \right] \quad (5)$$

Donde,

- A , A' , Z , y M son variables aleatorias independientes.
- A y A' , representan la edad del sensor al comienzo del ciclo.
- M es la duración del ciclo (medida en marcos).
- Z es el número de ranuras de tiempo hasta la primera transmisión exitosa dentro de un marco.

2.6. Media temporal

La forma más habitual de medir la AoI de una fuente en el destino es a través de la media temporal de la AoI [2, 11]. La media temporal de una función $f(t)$ en un intervalo de tiempo $[0, T]$ se define como:

$$\langle f \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt, \quad (6)$$

donde:

- $\langle f \rangle$ representa la media temporal de la función $f(t)$;

- T es el intervalo total de tiempo;
- $f(t)$ es la función cuyo promedio temporal se desea calcular;
- La integral se evalúa sobre el intervalo $[0, T]$.

3. Metodología

El documento se centra en el estudio y análisis de la *Age of Information* (AoI), una métrica utilizada para evaluar la frescura de la información en redes de sensores inalámbricos. Específicamente, se enfoca en el valor promedio de la métrica *Average Age of Information* (AAoI) aplicada a distintos protocolos de acceso múltiple híbrido (MAC). Estos protocolos se examinan y comparan mediante simulaciones y análisis matemático.

A continuación, se describen el modelo del sistema, los dos protocolos utilizados en las simulaciones y su comportamiento que ilustran el rendimiento de la métrica AAoI.

3.1. Modelo del Sistema

En este apartado se describe el modelo de sistema utilizado para evaluar la Average Age of Information (AAoI) en distintos protocolos de acceso múltiple híbrido en redes de sensores inalámbricos. El sistema se modela con base en una red de sensores que transmite información a una estación central de manera síncrona utilizando ranuras de tiempo.

3.1.1. Red y sus componentes

El modelo de la red se basa en una red inalámbrica de un solo salto, como se observa en la Figura 1, que incluye:

- **Sensores:** Cada sensor está sincronizado y genera datos de acuerdo con un proceso Bernoulli IID con tasa de llegada λ . Los sensores transmiten a una estación central en ranuras de tiempo predefinidas.
- **Estación Central:** La estación central recibe las transmisiones de los sensores y proporciona retroalimentación sobre la recepción de los paquetes, indicando si la transmisión fue exitosa o si hubo una colisión o pérdida de datos.
- **Mecanismo de Contienda:** El acceso al canal de transmisión puede estar sujeto a un proceso de contienda entre los sensores en determinadas ranuras.

3.1.2. Patrón de Tráfico

El tráfico generado por los usuarios en el sistema es modelado como un proceso de Bernoulli con una tasa de generación de paquetes λ para cada sensor. Se asume que

los paquetes generados por los sensores son independientes entre sí, y que el proceso de generación sigue una distribución idéntica para todos los sensores en escenarios simétricos (IID).

3.1.3. Protocolos

Se emplean dos protocolos híbridos principales que combinan acceso aleatorio y acceso controlado para gestionar la transmisión de datos en la red de sensores: ZMAC y EZMAC.

- ZMAC es un protocolo híbrido que opera en dos modos dependiendo de la carga de la red:
 - **CSMA en cargas bajas:** Los sensores compiten por el acceso al canal de forma aleatoria cuando la carga es baja.
 - **TDMA en cargas altas:** En situaciones de alta carga, ZMAC asigna ranuras de tiempo específicas a cada sensor para evitar colisiones.
- EZMAC es una versión modificada de ZMAC que optimiza la transmisión en las ranuras no propietarias. Este protocolo introduce una política de reserva que permite que solo los sensores con buffers llenos transmitan en estas ranuras, lo que puede reducir colisiones pero también aumentar la AoI en ciertos sensores.

3.1.4. AAoI

La *Average Age of Information* (AAoI) se define como el promedio del tiempo que ha pasado desde que se recibió el último paquete exitosamente en la estación central hasta el momento actual. La AoI es una métrica clave que se utiliza para evaluar la frescura de la información en sistemas de sensores.

La AAoI se mide en función de la tasa de llegada de paquetes λ en escenarios simétricos y asimétricos. Para cada protocolo, se evalúan los cambios en la AAoI en función de las políticas de acceso al canal. El rendimiento de los protocolos ZMAC y EZMAC se compara con una política centralizada, que se considera óptima pero más difícil de implementar en redes distribuidas.

3.1.5. Escenarios

Para evaluar el comportamiento de los protocolos ZMAC y EZMAC frente a la AAoI, se proponen dos escenarios principales:

- **Escenario de Baja Carga con Red Simétrica**

En este escenario, todos los sensores tienen la misma tasa de llegada ($\lambda_n = \lambda$) y la red opera con baja carga. Se busca analizar cómo se comporta la AoI en condiciones de baja contienda.

- **Escenario de Alta Carga en Red Simétrica**

Este escenario considera una red con alta tasa de generación de paquetes, lo que crea una alta carga en el canal. Se evalúan ambos protocolos, ZMAC y EZMAC, para comparar su gestión de la contienda y su impacto en la AAoI.

3.2. Protocolo ZMAC

ZMAC es un protocolo híbrido que combina características de CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) y TDMA (*Time Division Multiple Access*). Su comportamiento cambia dinámicamente según la carga de la red:

- **CSMA en cargas bajas:** ZMAC permite que múltiples sensores compitan por el acceso al canal en ranuras de tiempo libres utilizando un esquema de acceso aleatorio. Cada sensor puede intentar transmitir si detecta que el canal está libre.
- **TDMA en cargas altas:** En situaciones de alta carga, ZMAC asigna ranuras específicas a los sensores para asegurar que solo el sensor propietario de la ranura pueda transmitir en ese periodo, evitando colisiones.

Este protocolo fue evaluado en las simulaciones para medir cómo varía la AAoI en función de la tasa de llegada de paquetes λ en escenarios simétricos (donde todos los sensores tienen la misma tasa de llegada).

La AAoI es comparada para diferentes tasas de llegada, mostrando el rendimiento de ZMAC en condiciones simétricas. Estas gráficas evidencian cómo la AAoI se mantiene estable en diferentes niveles de carga de la red, demostrando que ZMAC ofrece un rendimiento cercano a una política centralizada en escenarios de carga alta y baja.

ZMAC es un protocolo híbrido diseñado para adaptarse dinámicamente a las condiciones cambiantes de tráfico en redes de sensores inalámbricos y redes ad-hoc [12], especialmente en el contexto del Internet de las Cosas (IoT). Este protocolo combina de manera eficaz las características de dos enfoques clásicos de control de acceso al medio (MAC): CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) y TDMA (*Time Division Multiple Access*), lo que le permite adaptarse a diversas condiciones de carga en la red.

Protocolo CSMA en condiciones de baja carga

En escenarios con tráfico bajo, donde solo unos pocos nodos intentan transmitir, ZMAC aprovecha las ventajas de CSMA. Esto quiere decir que, los sensores pueden competir por el acceso al canal de forma aleatoria. Cuando un nodo detecta que una ranura TDMA asignada está vacía (porque el nodo propietario no tiene datos que transmitir), otros nodos pueden contender para utilizarla. Este sistema aprovecha las oportunidades disponibles sin la rigidez de las asignaciones fijas, lo que resulta en un comportamiento eficiente similar al de CSMA, donde los nodos tienen la oportunidad de transmitir cuando el canal está libre, minimizando el retardo cuando hay poca actividad en la red.

Protocolo TDMA en condiciones de alta carga:

Mientras la carga de la red aumenta y más nodos intentan transmitir simultáneamente el riesgo de colisiones incrementa. En estas situaciones ZMAC cambia su comportamiento y actúa más como un protocolo TDMA, en el que cada nodo tiene asignada una ranura de tiempo específica durante la cual puede transmitir. Este enfoque asegura que solo el nodo propietario de una ranura determinada pueda transmitir en ese periodo, eliminando así las colisiones y asegurando una mejor transmisión y control sobre el uso del canal. Este cambio de comportamiento es crucial para evitar la inestabilidad y los grandes retrasos que pueden ocurrir bajo alta contención cuando se utiliza CSMA puro.

ZMAC fue evaluado en simulaciones donde se midió su rendimiento en términos de AAoI (Average Age of Information) en función de la tasa de llegada de paquetes, λ , en escenarios simétricos, es decir, situaciones donde todos los nodos tienen la misma tasa de llegada de datos. La AAoI es una métrica clave en redes de sensores, ya que mide la antigüedad promedio de la información disponible en la red, lo cual es crucial para aplicaciones IoT sensibles a los retrasos y la frescura de los datos.

Aunque ZMAC es un protocolo distribuido, los resultados muestran que su desempeño se acerca mucho al de un sistema centralizado, en el que un controlador central tiene conocimiento completo del estado de la red (como las longitudes de las colas en cada nodo) y puede asignar de manera óptima las ranuras de tiempo. En un sistema centralizado, el retardo y la AAoI pueden ser optimizados de manera más agresiva, pero ZMAC logra aproximarse a estos niveles sin requerir esa complejidad centralizada.

Entonces se puede decir que ZMAC ofrece un equilibrio interesante entre la flexibilidad del acceso aleatorio y la rigidez del acceso programado. En condiciones de baja carga, donde el retardo es más crítico que las colisiones, ZMAC actúa como CSMA, aprovechando ranuras vacías para minimizar el tiempo de espera antes de transmitir. En cambio, cuando la carga es alta, donde la estabilidad y la prevención de colisiones son más importantes, el protocolo cambia a TDMA, garantizando que cada nodo tenga acceso exclusivo a una ranura en su turno asignado. Este comportamiento dinámico es una de las principales fortalezas de ZMAC, lo que lo hace altamente adaptable en redes con tráfico variable.

3.3. Protocolo EZMAC

EZMAC es una versión modificada del protocolo ZMAC que ajusta la forma en que se manejan las transmisiones en ranuras que no pertenecen a un sensor en particular. En ZMAC, los sensores que compiten por el canal pueden transmitir en estas ranuras no asignadas. Sin embargo, EZMAC optimiza este proceso al retrasar las transmisiones en ranuras no asignadas hasta que el buffer del sensor que ganó la contienda esté completamente lleno, evitando así transmisiones innecesarias.

- **Reserva de transmisiones en ranuras no propietarias:** EZMAC intenta reducir el número de transmisiones innecesarias al asegurar que solo los sensores con buffers llenos puedan transmitir en ranuras no propietarias. Las ranuras no propietarias se refieren a aquellos intervalos de tiempo en los que un sensor no tiene asignada de

manera fija la oportunidad de transmitir datos, es decir, son ranuras disponibles para que otros sensores compitan por el acceso.

- **Impacto en la AoI:** Sin embargo, esta optimización puede aumentar la edad de la información de otros sensores si no logran transmitir debido a esta restricción, pues su información se vuelve obsoleta mientras esperan la oportunidad de transmitir.

EZMAC muestra una comparación directa con ZMAC. En escenarios simétricos, las simulaciones revelan que, en términos de AAoI, EZMAC no siempre supera a ZMAC, especialmente cuando la política de reserva de transmisiones introduce retrasos adicionales.

EZMAC es una versión mejorada del protocolo ZMAC diseñada específicamente para abordar uno de los mayores desafíos de ZMAC: el retardo ligado con el mecanismo de contienda durante las ranuras TDMA vacías[12]. Si bien ZMAC ya ofrece una solución eficiente para manejar tráfico variable en redes de sensores inalámbricos, el protocolo sufre retrasos considerables debido a la alta frecuencia de contiendas cuando las ranuras TDMA no son utilizadas por el nodo asignado. EZMAC introduce mejoras significativas en la gestión de estas ranuras vacías, enfocándose en optimizar el tiempo de transmisión y reducir los retrasos en escenarios de tráfico alto y medio.

Modificación en la resolución de contienda

En ZMAC, cuando una ranura TDMA está vacía (porque el nodo asignado no tiene datos para transmitir), otros nodos compiten para usar esa ranura. Este enfoque, aunque funcional, tiene un problema: las contiendas frecuentes entre nodos para acceder a estas ranuras vacías generaban colisiones, lo que resultaba en desperdicio de ranuras y un aumento en el retardo.

EZMAC introduce una modificación crucial que cuando un nodo gana la contienda para una ranura vacía, se le permite seguir transmitiendo en esa ranura hasta que su cola de transmisión esté vacía, en lugar de forzar una nueva contienda en cada ranura vacía subsecuente. Este cambio minimiza el número de contiendas necesarias, lo que reduce la posibilidad de colisiones y optimiza el uso del canal. El efecto de esta optimización es una reducción considerable en el tiempo de retardo, ya que un nodo puede continuar enviando datos sin interrupciones innecesarias hasta que vacíe su buffer de transmisión.

Reserva de transmisiones en ranuras no propietarias

En EZMAC, se introduce un enfoque adicional para reducir las transmisiones innecesarias en ranuras no asignadas (ranuras que no pertenecen a un sensor específico en un esquema TDMA). Bajo este esquema, solo los sensores con colas llenas pueden acceder a estas ranuras vacías. La idea detrás de esta reserva es reducir la competencia y asegurar que los sensores que realmente necesitan transmitir puedan hacerlo de manera eficiente, sin tener que contender con sensores cuyos buffers están vacíos o semi vacíos.

Uno de los beneficios más notables de EZMAC es su capacidad para reducir el retardo, especialmente en escenarios de carga media y alta. En ZMAC, el ciclo constante de

contienda para acceder a las ranuras vacías podía generar un alto nivel de colisiones, lo que aumentaba el tiempo de espera de los paquetes antes de ser transmitidos. En contraste, EZMAC, al permitir que un nodo ganador de la contienda continúe transmitiendo sin interrupciones hasta que vacíe su buffer, reduce de manera drástica el tiempo que los paquetes pasan en cola antes de ser enviados. Esto es particularmente relevante en escenarios donde la latencia es crítica, ya que disminuye significativamente los retrasos en la entrega de información.

Aunque EZMAC logra una reducción efectiva del retardo, también puede tener un impacto negativo en la Average Age of Information (AoI). La restricción de que solo los sensores con colas llenas puedan acceder a las ranuras vacías podría provocar que algunos nodos queden "sin información" de canal, es decir, que no puedan transmitir mientras otros nodos siguen utilizando el canal. Como resultado, la información de estos nodos podría volverse obsoleta mientras esperan su turno para transmitir. Este aumento en la edad de la información (AoI) podría ser problemático en aplicaciones donde la frescura de los datos es esencial, como en redes de monitoreo en tiempo real, donde los datos actuales y precisos son fundamentales para el correcto funcionamiento del sistema.

3.3.1. Diferencias clave entre ZMAC y EZMAC

Existen varias diferencias significativas entre ZMAC y su versión mejorada EZMAC, que resultan en un rendimiento más eficiente y optimizado en ciertas condiciones de red.

- **Frecuencia de contiendas:** En el protocolo ZMAC, cada vez que una ranura TDMA queda vacía, se requiere una nueva contienda para determinar qué nodo puede transmitir, lo que provoca colisiones frecuentes y, en consecuencia, un aumento en el retardo. En cambio, EZMAC introduce una mejora sustancial: una vez que un nodo gana la contienda por una ranura vacía, se le permite seguir transmitiendo hasta que vacíe su buffer. Este enfoque reduce considerablemente el número de contiendas y optimiza la utilización del canal.
- **Retardo:** Debido a la reducción en la cantidad de contiendas, EZMAC consigue un retardo mucho menor en comparación con ZMAC, especialmente en escenarios de alta carga de tráfico. En condiciones donde múltiples nodos intentan transmitir simultáneamente, ZMAC tiende a sufrir retrasos ocasionados por colisiones recurrentes. EZMAC, al disminuir la sobrecarga de las contiendas, optimiza el tiempo de transmisión, mejorando significativamente el desempeño bajo carga pesada.
- **Equidad:** Aunque EZMAC minimiza el retardo, introduce un desafío relacionado con la equidad en el acceso al canal. Los nodos que ganan la contienda tienen la capacidad de continuar transmitiendo hasta vaciar completamente sus colas, lo cual puede causar que otros nodos experimenten una falta temporal de acceso al canal, dejándolos "hambrientos" de recursos. Este problema es más pronunciado en redes con alta carga, donde las colas de los nodos se llenan rápidamente, lo que podría generar mayores tiempos de espera para aquellos nodos que no acceden frecuentemente al canal.

3.4. Comportamiento de la AoI frente a cada Protocolo

Para analizar cómo se comporta la *Age of Information* (AoI) frente a cada protocolo, se consideran los diferentes esquemas de acceso múltiples mencionados: ZMAC y EZMAC.

3.4.1. Comportamiento del Protocolo EZMAC

EZMAC es una variante de ZMAC que introduce una optimización para las transmisiones en ranuras no propietarias:

- **Reserva de transmisiones:** EZMAC optimiza las transmisiones permitiendo que solo los sensores con buffers llenos transmitan en ranuras no propietarias. Esta optimización puede disminuir las transmisiones innecesarias y, por lo tanto, reducir las colisiones en condiciones específicas.
- **Impacto en la AoI:** Sin embargo, este enfoque puede tener un efecto adverso en la AoI. Si un sensor con una alta AoI no puede acceder a una ranura no propietaria debido a la política de reserva, su AoI podría aumentar, ya que su información se vuelve obsoleta mientras espera la oportunidad de transmitir. En redes con alta variabilidad en las tasas de llegada de paquetes, EZMAC podría llevar a mayores AoI para sensores que no ganan la contienda.
- **Prioridad al sensor con mayor AoI:** En este esquema, el controlador central siempre prioriza al sensor cuya AoI es la más alta, lo que significa que la información más obsoleta se actualiza primero.
- **Impacto en la AoI con priorización:** Este enfoque minimiza la AoI de manera efectiva, ya que asegura que los sensores con la información más antigua transmitan primero, reduciendo así la edad máxima de la información en la red. En un sistema ideal, esta política puede llevar la AoI a valores cercanos a su límite inferior teórico.

Aunque optimiza la eficiencia del canal, EZMAC puede incrementar la AoI para ciertos sensores en situaciones de contienda intensa o en redes asimétricas, donde algunos sensores tienen mayores necesidades de transmisión que otros.

El siguiente diagrama de bloques de la figura 5 muestra el flujo de decisión de los protocolos híbridos ZMAC y EZMAC en función de la carga de la red. El protocolo ZMAC evalúa la carga de la red y decide entre usar CSMA (Acceso Aleatorio) cuando la carga es baja, o TDMA (Asignación de Ranuras) cuando la carga es alta. En el caso de EZMAC, se añade una restricción en el modo TDMA, donde solo los sensores con buffers llenos pueden transmitir en ranuras no propietarias. Este flujo optimiza la transmisión de datos y reduce colisiones, pero en algunos casos puede aumentar la Edad de la Información (AoI) en sensores que deben esperar para transmitir.

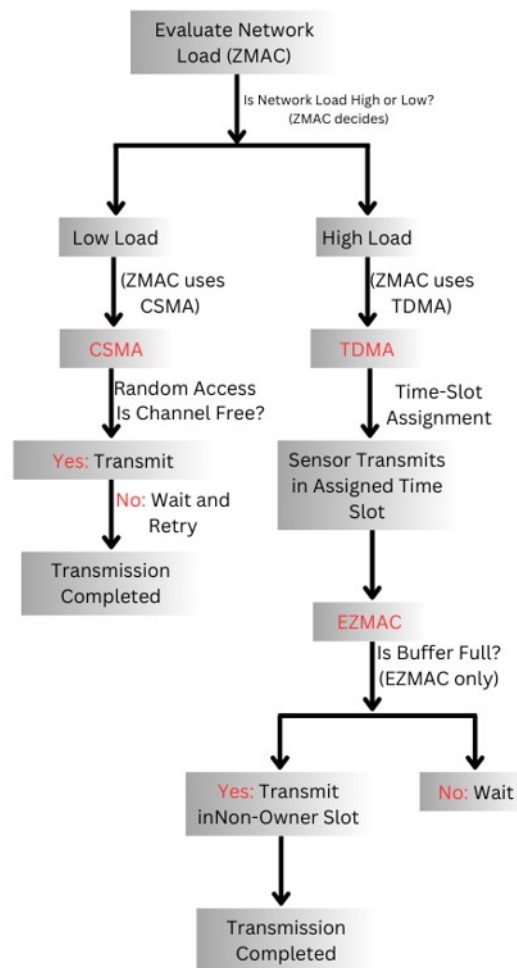


Figura 5: Diagrama de Bloques del Funcionamiento de los Protocolos ZMAC y EZMAC en Redes de Sensores Inalámbricos.

3.5. Impacto del AoI en los protocolos ZMAC y EZMAC

El *Average Age of Information* (AoI) es una métrica crucial en redes de sensores y sistemas IoT, dado que mide la antigüedad promedio de la información que un nodo reporta a la red. Un bajo AoI es esencial para aplicaciones en las que se requiere información en tiempo real y donde la frescura de los datos es crítica. A continuación, se analiza cómo el AoI se ve afectado por los protocolos ZMAC y EZMAC.

AoI en ZMAC: El protocolo ZMAC presenta una dinámica en la que la métrica AoI varía en función del régimen de tráfico de la red. En situaciones de carga baja, ZMAC se comporta de manera similar a CSMA, lo que permite a los nodos transmitir en ranuras vacías, minimizando el tiempo que los paquetes permanecen en cola. Este comportamiento tiende a reducir el AoI, ya que los nodos pueden acceder al canal rápidamente cuando el tráfico es bajo, manteniendo los datos frescos. Sin embargo, a medida que la carga de la

red aumenta, ZMAC se inclina hacia un comportamiento similar a TDMA, donde cada nodo debe esperar su ranura asignada para transmitir, incluso si el canal está bajo alta contención. Esto puede incrementar el AoI, ya que los datos en los nodos experimentan mayores tiempos de espera, especialmente en situaciones donde las contiendas generan colisiones frecuentes.

AoI en EZMAC: EZMAC, por su parte, introduce una mejora en la resolución de contiendas, permitiendo que el nodo que gana la contienda continúe transmitiendo hasta vaciar su buffer. Este enfoque reduce significativamente el retardo, lo que potencialmente podría disminuir el AoI en escenarios de tráfico alto, ya que los datos pueden ser transmitidos sin interrupciones. Sin embargo, EZMAC también puede tener un efecto adverso en la equidad del acceso al canal. Los nodos que no ganan la contienda pueden experimentar largos periodos de inactividad, lo que aumenta el AoI para esos nodos. En aplicaciones donde la frescura de la información es crítica y la equidad en la transmisión es esencial, este aumento en el AoI podría ser problemático. En resumen, aunque EZMAC optimiza la eficiencia en la transmisión para nodos con tráfico elevado, el acceso desigual al canal puede aumentar el AoI en otros nodos que quedan temporalmente excluidos de la transmisión.

Comparación del AoI entre ZMAC y EZMAC: En términos generales, ZMAC tiende a mantener un AoI más equilibrado en condiciones de baja carga debido a su comportamiento similar a CSMA, donde los nodos pueden aprovechar las ranuras vacías para transmitir rápidamente. No obstante, a medida que la carga aumenta y el protocolo transiciona a un comportamiento más estructurado como TDMA, el AoI puede incrementarse debido a la mayor latencia en la transmisión de paquetes. En contraste, EZMAC logra mejorar significativamente el retardo y el uso del canal en escenarios de alta carga, lo que puede disminuir el AoI para nodos con buffers llenos. Sin embargo, esta mejora se obtiene a costa de sacrificar la equidad en el acceso al medio, lo que puede aumentar el AoI para los nodos que quedan rezagados.

En redes donde la frescura de los datos es crucial, el comportamiento del AoI debe ser cuidadosamente considerado al seleccionar entre ZMAC y EZMAC. ZMAC ofrece un mejor balance en condiciones de baja carga, mientras que EZMAC optimiza el retardo a costa de la equidad, afectando así la frescura de la información en nodos que no pueden acceder al canal con frecuencia. La elección entre estos protocolos debe basarse en las prioridades específicas de la aplicación, tales como la necesidad de baja latencia o la equidad en el acceso al canal.

4. Resultados

En este apartado, se presentan los resultados de la simulación del Average Age of Information (AAoI) para un protocolo de acceso múltiple híbrido en una red inalámbrica de un solo salto, considerando dos escenarios con un número diferente de sensores. La simulación se realiza para diferentes valores de la tasa de llegada λ_n , que es la misma para todos los sensores, lo que describe un escenario simétrico.

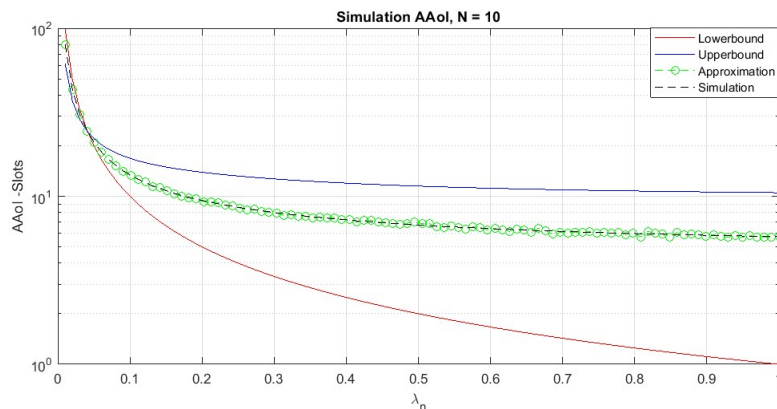


Figura 6: Curvas de AAoI simuladas para un protocolo de control de acceso múltiple híbrido con $N = 10$ en función de la tasa de llegada λ_n . Se incluyen las cotas superior e inferior, junto con una aproximación teórica. La curva de simulación muestra los resultados con el modelo codificado en MATLAB.

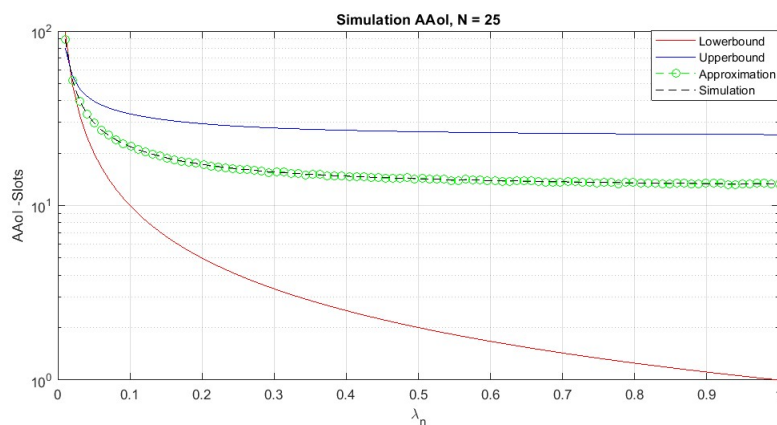


Figura 7: Curvas de AAoI simuladas para un protocolo de control de acceso múltiple híbrido con $N = 25$ en función de la tasa de llegada λ_n . Se incluyen las cotas superior e inferior, junto con una aproximación teórica. La curva de simulación muestra los resultados con el modelo codificado en MATLAB.

Ahora en lugar de analizar un rango continuo de tasas de llegada, estamos observando cómo se comporta el sistema en puntos específicos. El foco está en analizar el Average

Age of Information (AAoI), que mide el tiempo promedio que transcurre desde que un paquete de información es generado por un sensor hasta que es recibido y procesado en el destino.

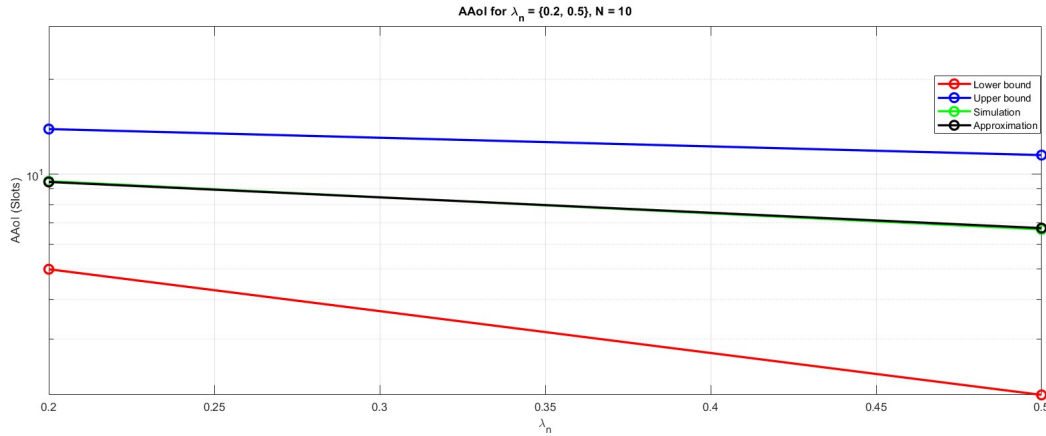


Figura 8: Análisis comparativo del Average Age of Information (AAoI) en un sistema de control de acceso múltiple híbrido para $N = 10$, con tasas de llegada específicas $\lambda_n = 0,2$ y $\lambda_n = 0,5$. Las curvas presentadas incluyen las cotas analíticas superior e inferior, junto con una aproximación teórica y los resultados de simulación.

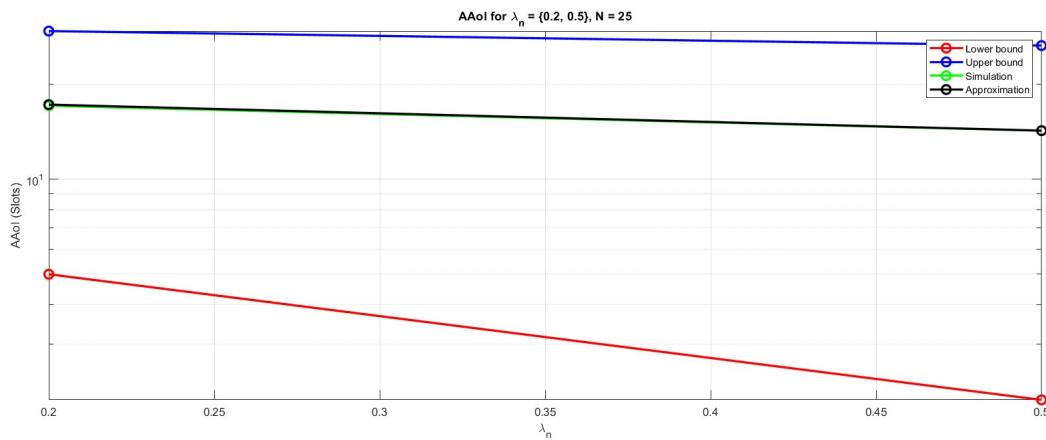


Figura 9: Análisis comparativo del Average Age of Information (AAoI) en un sistema de control de acceso múltiple híbrido para $N = 25$, con tasas de llegada específicas $\lambda_n = 0,2$ y $\lambda_n = 0,5$. Las curvas presentadas incluyen las cotas analíticas superior e inferior, junto con una aproximación teórica y los resultados de simulación.

En este estudio, se ha investigado el comportamiento del *Average Age of Information* (AAoI) en un sistema de acceso múltiple híbrido, evaluando diversas configuraciones en cuanto al número de sensores N como podemos ver en la figura 6 y 7, y a las tasas de llegada de paquetes λ_n . El análisis se ha centrado en dos valores específicos de λ_n , 0.2

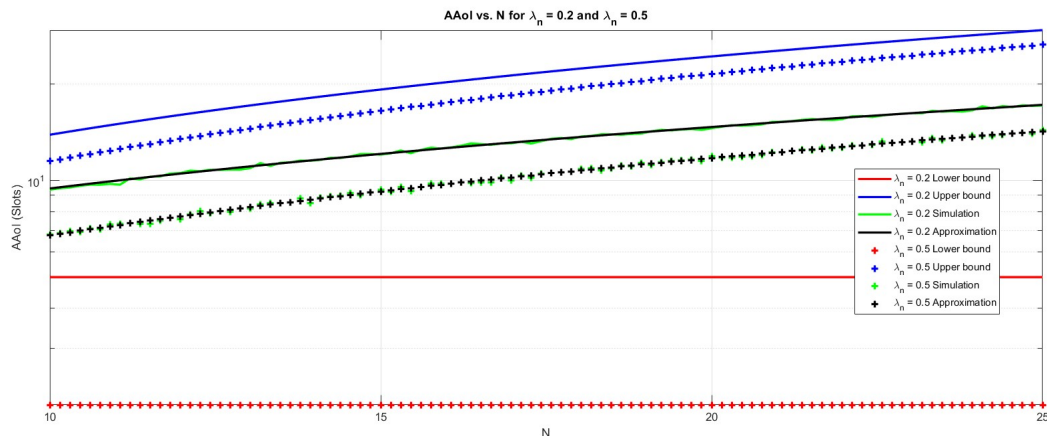


Figura 10: Average Age of Information (AAoI) en función del número de sensores N para dos tasas de llegada $\lambda_n = 0,2$ y $\lambda_n = 0,5$ en un sistema de acceso múltiple híbrido. Se presentan las cotas analíticas superior e inferior, junto con una aproximación teórica y los resultados de simulación. Las curvas para $\lambda_n = 0,2$ se muestran como líneas sólidas, mientras que las correspondientes a $\lambda_n = 0,5$ se representan con líneas punteadas. Este análisis revela cómo el AAoI varía con N bajo diferentes condiciones de carga, destacando la precisión de la aproximación teórica en la estimación del comportamiento del sistema.

en la figura 3 y 0.5 en la figura 9, que representan condiciones de carga baja y media en la red, respectivamente. En la figura 10 se evaluó la métrica en función al número de sensores en la red utilizando un λ_n fijo de las figuras anteriores.

Las curvas obtenidas para cada configuración de N y λ_n permitieron realizar una comparación detallada entre las cotas analíticas superior e inferior, la aproximación teórica, y los resultados obtenidos mediante simulación. Estos gráficos muestran que los resultados de la simulación y la aproximación teórica coinciden, lo que valida el modelo matemático utilizado. En particular, la aproximación teórica ha demostrado ser efectiva para predecir el comportamiento del AAoI, mientras que las cotas superior e inferior proporcionan límites claros dentro de los cuales opera el sistema.

Al analizar cómo varía el AAoI en función del número de sensores N bajo diferentes tasas de llegada, se observó que un incremento en N tiende a aumentar el AAoI, especialmente bajo condiciones de mayor carga ($\lambda_n = 0,5$). Sin embargo, la aproximación teórica se mantiene precisa y robusta, destacando su utilidad como herramienta para el diseño y la optimización de redes de sensores en escenarios reales. En la figura 10 cuando el tráfico es bajo ($\lambda_n = 0,2$), se observa que ambos protocolos mantienen una AoI relativamente baja, pero ZMAC es más eficiente en general. En cambio, en condiciones de mayor tráfico ($\lambda_n = 0,5$), la AoI de EZMAC tiende a ser más variable, especialmente cuando algunos nodos no pueden acceder al canal.

Continuando con el análisis de los protocolos utilizados se obtuvo los resultados que se ilustran en la figura 4. En ambos casos, se observa que la AAoI decrece a medida que λ_n aumenta, lo cual es atribuible a la mayor frecuencia de actualizaciones de información

que se producen cuando la tasa de llegada es alta. Este comportamiento sugiere que, en condiciones de baja carga (es decir, cuando λ_n es pequeño), los sensores experimentan mayores tiempos de espera entre actualizaciones exitosas, lo que se traduce en una mayor AAOI. Conforme λ_n aumenta, la tasa de actualizaciones mejora, reduciendo así el tiempo promedio entre las actualizaciones y, consecuentemente, la AAOI.

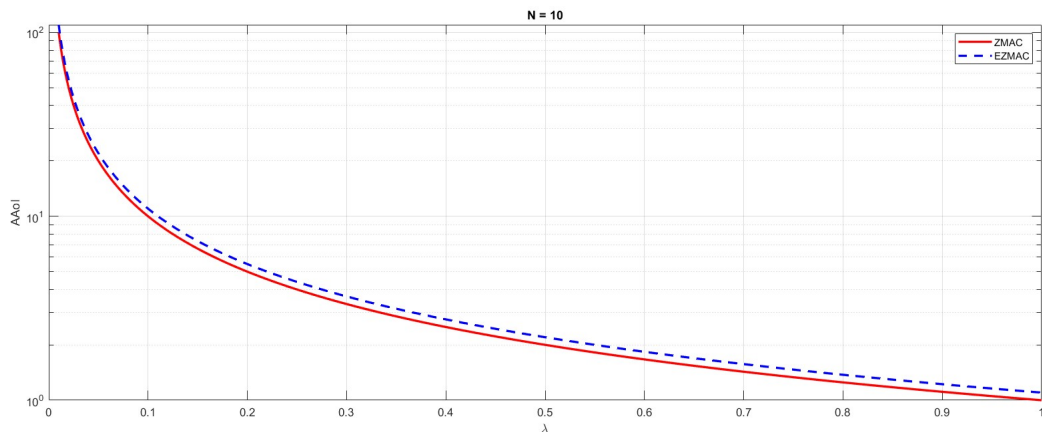


Figura 11: Comparación de la Edad Promedio de la Información (AAoI) simulada para los protocolos ZMAC y EZMAC bajo un escenario simétrico, en el que todos los sensores tienen la misma tasa de llegada λ_n . Los resultados se presentan para $N = 10$.

Para valores elevados de λ_n , la AAOI se estabiliza en ambos protocolos, lo que indica una convergencia hacia un comportamiento similar al de un esquema de acceso múltiple basado en TDMA. En este régimen, la transmisión de los sensores se realiza de manera más ordenada, con cada sensor ocupando de manera efectiva su ranura asignada, lo que minimiza la competencia entre sensores y contribuye a mantener la frescura de la información.

En cuanto a la comparación entre los protocolos, ZMAC, representado por la curva sólida roja, y EZMAC, representado por la curva azul punteada, muestran un comportamiento similar en términos de AAOI en todos los rangos de λ_n . Sin embargo, se aprecia una leve degradación en el rendimiento de EZMAC, especialmente en los valores bajos de λ_n , lo cual puede ser atribuido a los mecanismos de contención adicionales que introduce este protocolo, lo que en algunos casos provoca un aumento en los tiempos de espera antes de que se produzcan transmisiones exitosas. Este efecto es más notable a medida que el número de sensores N aumenta, donde la competencia por los recursos de transmisión es mayor.

5. Conclusiones

Este estudio ha permitido evaluar el impacto que los protocolos híbridos de acceso múltiple (MAC), específicamente ZMAC y EZMAC, tienen sobre el Age of Information

(AoI) en redes IoT, aportando nuevos conocimientos a la investigación en este campo.

- El AoI se ha establecido como una métrica fundamental para evaluar la frescura de la información en redes de sensores. Dado que mide el tiempo transcurrido desde la generación de la última actualización hasta su recepción en el nodo central, su uso es crucial en aplicaciones donde la puntualidad de la información es esencial, como la estimación remota y otros sistemas basados en actualizaciones de estado en tiempo real.
- Los resultados demuestran que los protocolos de control de acceso múltiple híbrido, como ZMAC y EZMAC, son capaces de adaptarse a las condiciones de la red, optimizando la eficiencia en términos de frescura de datos. Al combinar las ventajas del acceso aleatorio y el acceso programado, estos protocolos garantizan un buen desempeño, particularmente en escenarios de carga variable.
- A través de extensivas simulaciones, se ha demostrado que ZMAC ofrece un rendimiento sólido en términos de Age of Information (AoI) bajo diversas condiciones de carga, tanto alta como baja. En contraste, EZMAC presentó un desempeño inferior en ciertos escenarios debido a su estrategia de reserva de transmisión para sensores no propietarios, lo que retrasa las actualizaciones hasta que los buffers estén llenos, incrementando así el AoI en algunos casos.
- El análisis de los límites superior e inferior del AoI en los protocolos ZMAC y EZMAC permite caracterizar con precisión su desempeño en diferentes condiciones de red. Este análisis es esencial para optimizar las configuraciones de red, minimizando el AoI y garantizando que la información transmitida sea lo más reciente posible, un factor crucial en aplicaciones donde la frescura de los datos determina la calidad del servicio.

Referencias

- [1] AR Al-Ali, Imran Zualkernan, and Fadi Aloul. A mobile gprs-sensors array for air pollution monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 10(10):1666–1671, 2010.
- [2] Andrea Biral, Marco Centenaro, Andrea Zanella, Lorenzo Vangelista, and Michele Zorzi. The challenges of m2m massive access in wireless cellular networks. *Digital Communications and Networks*, 1(1):1–19, 2015.
- [3] Alejandro Cama-Pinto, Emiro De-La-Hoz-Franco, and Dora Cama-Pinto. Las redes de sensores inalámbricos y el internet de las cosas. *Inge Cuc*, 2012.
- [4] Tarak Gandhi and Mohan Manubhai Trivedi. Pedestrian protection systems: Issues, survey, and challenges. *IEEE Transactions on intelligent Transportation systems*, 8(3):413–430, 2007.

-
- [5] Qing He, Di Yuan, and Anthony Ephremides. Optimizing freshness of information: On minimum age link scheduling in wireless systems. In *2016 14th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*, pages 1–8. IEEE, 2016.
- [6] Qing He, Di Yuan, and Anthony Ephremides. Optimal link scheduling for age minimization in wireless systems. *IEEE Transactions on Information Theory*, 64(7):5381–5394, 2017.
- [7] Yu-Pin Hsu, Eytan Modiano, and Lingjie Duan. Age of information: Design and analysis of optimal scheduling algorithms. In *2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, pages 561–565. IEEE, 2017.
- [8] Igor Kadota, Elif Uysal-Biyikoglu, Rahul Singh, and Eytan Modiano. Minimizing the age of information in broadcast wireless networks. In *2016 54th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)*, pages 844–851. IEEE, 2016.
- [9] Sanjit Kaul, Marco Gruteser, Vinuth Rai, and John Kenney. Minimizing age of information in vehicular networks. In *2011 8th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, pages 350–358. IEEE, 2011.
- [10] Sanjit Kaul, Roy Yates, and Marco Gruteser. Real-time status: How often should one update? In *2012 Proceedings IEEE INFOCOM*, pages 2731–2735. IEEE, 2012.
- [11] Antzela Kosta, Nikolaos Pappas, and Vangelis Angelakis. Age of information: A new concept, metric, and tool. *Foundations and Trends in Networking*, 12(3):162–259, 2017.
- [12] Avinash Mohan, Arpan Chattopadhyay, and Anurag Kumar. Hybrid mac protocols for low-delay scheduling. In *2016 IEEE 13th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS)*, pages 47–55. IEEE, 2016.
- [13] Injong Rhee, Ajit Warrier, Mahesh Aia, and Jeongki Min. Z-mac: a hybrid mac for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 90–101, 2005.
- [14] Aasmund Søråa. A machine learning based prediction model for bursty traffic in 5g mmTc networks. Master’s thesis, Universitetet i Agder; University of Agder, 2019.
- [15] John A Stankovic. Research directions for the internet of things. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1):3–9, 2014.
- [16] Yin Sun, Elif Uysal-Biyikoglu, Roy D Yates, C Emre Koksal, and Ness B Shroff. Update or wait: How to keep your data fresh. *IEEE Transactions on Information Theory*, 63(11):7492–7508, 2017.

-
- [17] Rajat Talak, Sertac Karaman, and Eytan Modiano. Minimizing age-of-information in multi-hop wireless networks. In *2017 55th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)*, pages 486–493. IEEE, 2017.
- [18] BS Vineeth and Reuben Chacko Thomas. On the average age-of-information for hybrid multiple access protocols. *IEEE Networking Letters*, 4(2):87–91, 2022.
- [19] Wannarat Yim-Im, Haiyan Huang, Jie Park, Chong Wang, Gabriela Calzada, Phillip Gauger, Karen Harmon, Rodger Main, and Jianqiang Zhang. Comparison of zmac and marc-145 cell lines for improving porcine reproductive and respiratory syndrome virus isolation from clinical samples. *Journal of Clinical Microbiology*, 59(3):10–1128, 2021.