

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE
SISTEMAS Y COMPUTACIÓN**



RETO CAPA DE COMUNICACION: RED

MISW 4401– DISEÑO DE SISTEMAS IOT

Profesores:

Kelly Garces
Carlos Lozano

Equipo 9 Pareja 2:

Jerónimo A. Pineda Cano – 202212778
Sergio Castaño – 202310390

2026 – 1

Introducción	4
Sección 1: Repositorio	4
Sección 2: Comparación de resultados	5
i. ¿Cuál de los protocolos agotó más rápido la batería? ¿A qué se debe esto?	5
ii. ¿Algún estándar no agotó la batería y la simulación finalizó por el número de mensajes enviados?.....	6
iii. ¿Cuántas iteraciones en promedio tardó en agotar la batería cada estándar?	6
Evidencias:	6
Sección 3: Reflexión Técnica.....	10

Introducción

Los sistemas de Internet de las Cosas (IoT) han emergido como pilares fundamentales para la transformación digital de sectores críticos como el monitoreo ambiental, la agricultura de precisión y las ciudades inteligentes. Su capacidad para integrar la capa física del mundo real con el dominio digital depende de la interacción armoniosa entre dos capas esenciales: la capa de dispositivos (sensores, actuadores y hardware embebido) y la capa de comunicaciones (protocolos y redes que transportan los datos). La elección tecnológica en cada una de estas capas no es trivial; define el equilibrio entre el costo de despliegue, la vida útil del sistema, la confiabilidad de los datos y la escalabilidad de la solución.

En el contexto específico del monitoreo y alerta temprana de incendios forestales, como el piloto propuesto para los cerros orientales de Bogotá, este equilibrio se vuelve aún más crucial. Se requiere una red de sensores robusta, energéticamente eficiente y de amplia cobertura, capaz de operar en condiciones geográficas desafiantes y de transmitir información crítica con la oportunidad necesaria para activar protocolos de emergencia. Implementar y probar físicamente estas redes conlleva desafíos técnicos y financieros significativos, haciendo de la simulación computacional una herramienta indispensable para la validación de arquitecturas, la estimación de vida útil y la comparación objetiva de tecnologías antes de su despliegue en campo.

El presente reto se enfoca en el análisis profundo de la capa de comunicaciones mediante el simulador CupCarbon. Partiendo de un escenario base de detección de incendios, se escala la red a 18 nodos sensores y un nodo base, modificando los parámetros operativos (intervalo de envío de 10 ms y límite de 1000 transmisiones) para evaluar de manera comparativa el desempeño de tres protocolos inalámbricos estandarizados: Zigbee (IEEE 802.15.4), WiFi (IEEE 802.11) y LoRa. El objetivo central es cuantificar y analizar su consumo energético, un métrico determinante para la viabilidad de cualquier solución IoT autónoma y alimentada por baterías.

A través de este ejercicio, no solo se obtendrán resultados cuantitativos sobre la eficiencia de cada protocolo, sino que se fundamentará una reflexión técnica que vincule estos resultados con los principios teóricos de operación de cada tecnología, las características de la capa de dispositivos y los requisitos de la aplicación final. Este documento presenta la metodología, los resultados comparativos y el análisis derivado de dicha simulación, ofreciendo una guía fundamentada para la toma de decisiones en el diseño de sistemas IoT de misión crítica.

Sección 1: Repositorio

Todo el trabajo desarrollado para este reto, incluyendo los archivos de simulación, scripts y resultados, está disponible para su revisión en el siguiente repositorio público de GitHub:
Enlace: <https://github.com/5ergioC/Reto-Capa-de-Red>

El repositorio contiene la estructura nativa generada por CupCarbon. Para facilitar la verificación del cumplimiento de los requisitos, se destacan los siguientes componentes esenciales:

Configuración de la red de 21 nodos: La carpeta /Reto/nodes/ contiene los archivos de configuración individual para cada dispositivo, específicamente el archivo basestation_1 para el nodo central y 21 archivos del tipo sensor_X, lo que demuestra la expansión del escenario original tal como se solicitó.

Scripts de comportamiento modificados: En la carpeta /Reto/scripts/ se encuentran los archivos script_sensor.csc y script_base.csc. Estos scripts fueron modificados para integrar la transmisión cada 10 ms, el límite de 1000 mensajes, el monitoreo de batería y la lógica de parada (stop / critico), cumpliendo con todas las especificaciones del reto.

Parámetros de comunicación por tecnología: La carpeta /Reto/sensor_radios/ incluye archivos de configuración independientes para la basestation y los sensor. Esta separación permitió aplicar y alternar de manera controlada los parámetros de radio para cada uno de los tres estándares evaluados: Zigbee (802.15.4), WiFi y LoRa.

Resultados y datos exportados: La carpeta /Reto/results/ almacena el archivo wisen_simulation.csv, que contiene los datos detallados de consumo energético, mensajes y estados finales de cada simulación. Estos datos son la base para el análisis comparativo presentado en la siguiente sección.

Esta organización permite replicar exactamente las simulaciones y verificar que la implementación satisface los criterios de modificación del escenario, adaptación de los scripts y evaluación de las tres tecnologías de comunicación.

Sección 2: Comparación de resultados

Con el objetivo de comparar el comportamiento energético y de comunicación de diferentes estándares en un sistema IoT, se realizaron simulaciones independientes empleando los protocolos Zigbee (IEEE 802.15.4), WiFi y LoRa. En todos los escenarios se mantuvieron constantes la topología base, el número de nodos sensores y la frecuencia de transmisión (10 ms), variando únicamente el estándar de comunicación configurado en CupCarbon. Los resultados se analizan a partir de las gráficas de consumo energético y los registros de consola obtenidos durante cada simulación.

i. ¿Cuál de los protocolos agotó más rápido la batería? ¿A qué se debe esto?

De los tres protocolos evaluados, Zigbee fue el que presentó el mayor consumo energético concentrado en un nodo específico, aunque sin llegar a agotar completamente la batería. Como se observa en las gráficas de consumo energético (*Ilustración 2*), durante los primeros diez segundos de la simulación se evidencia un consumo significativamente mayor en el sensor por el cual se propagaban la mayoría de las alertas hacia el nodo base. Este comportamiento es consistente con una topología multi-salto, en la cual ciertos nodos actúan como puntos de retransmisión y, por tanto, asumen una mayor carga de transmisión.

Antes de que la simulación se interrumpiera, dicho sensor alcanzó un valor aproximado de 60 J en el parámetro Energy Max, mientras que los demás nodos presentaron un consumo considerablemente menor. La finalización de la simulación ocurrió antes de que este nodo agotara completamente su batería, por lo que no se presentó un evento de batería crítica.

En el caso de WiFi, no fue posible realizar una evaluación energética concluyente, ya que la simulación no logró propagar correctamente los mensajes entre los nodos (*Ilustración 4*). Aunque la topología mostraba conectividad según la visualización de CupCarbon, los mensajes no se difundieron en la red y, por tanto, no se generó un consumo energético

representativo. En discusiones previas reportadas en Slack se mencionó que este comportamiento podría estar relacionado con la configuración del identificador del nodo base; sin embargo, en este caso el nodo base ya contaba con un identificador distinto de cero, por lo que la causa exacta del problema no pudo determinarse.

Para LoRa, el consumo energético fue claramente inferior y más uniforme entre los nodos sensores (*Ilustración 6*), lo cual concuerda con el diseño del protocolo, orientado a comunicaciones de largo alcance con bajo consumo energético.

ii. ¿Algún estándar no agotó la batería y la simulación finalizó por el número de mensajes enviados?

Sí. En el caso de LoRa, la simulación finalizó sin que se presentara agotamiento crítico de batería en los nodos sensores (*Ilustración 7*). Dado el bajo consumo energético observado, es razonable suponer que, de no haberse presentado eventos de saturación del buffer asociados a la alta frecuencia de transmisión configurada, la simulación habría finalizado por el límite máximo de mensajes enviados definido en los scripts.

Por el contrario, Zigbee no finalizó por agotamiento de batería ni por el número máximo de mensajes, sino por una interrupción anticipada del proceso de simulación (*Ilustraciones 2 y 3*), lo cual impidió observar el comportamiento completo del sistema hasta alguno de estos criterios de parada.

En el caso de WiFi, la falta de propagación de mensajes impidió que la simulación alcanzara cualquiera de las condiciones de finalización previstas, por lo que no es posible determinar si el sistema habría terminado por consumo energético o por número de transmisiones.

iii. ¿Cuántas iteraciones en promedio tardó en agotar la batería cada estándar?

Dado que ninguno de los protocolos alcanzó un estado de agotamiento completo de la batería durante las simulaciones, no es posible calcular un número promedio de iteraciones necesarias para dicho evento. En Zigbee, aunque se observó un consumo energético acelerado en un nodo específico, la batería no llegó a un nivel crítico antes de la interrupción de la simulación. En LoRa, el bajo consumo energético sugiere que el sistema podría operar durante un número significativamente mayor de iteraciones antes de agotar la batería, mientras que en WiFi no se dispone de información suficiente debido a la ausencia de tráfico efectivo en la red.

Estos resultados evidencian que, bajo condiciones de alta frecuencia de transmisión y alta densidad de nodos, factores como la topología de la red, la concentración del tráfico, la gestión del buffer y la estabilidad de la simulación pueden influir de manera decisiva en el comportamiento observado, incluso más que el consumo energético puro del protocolo.

Evidencias:

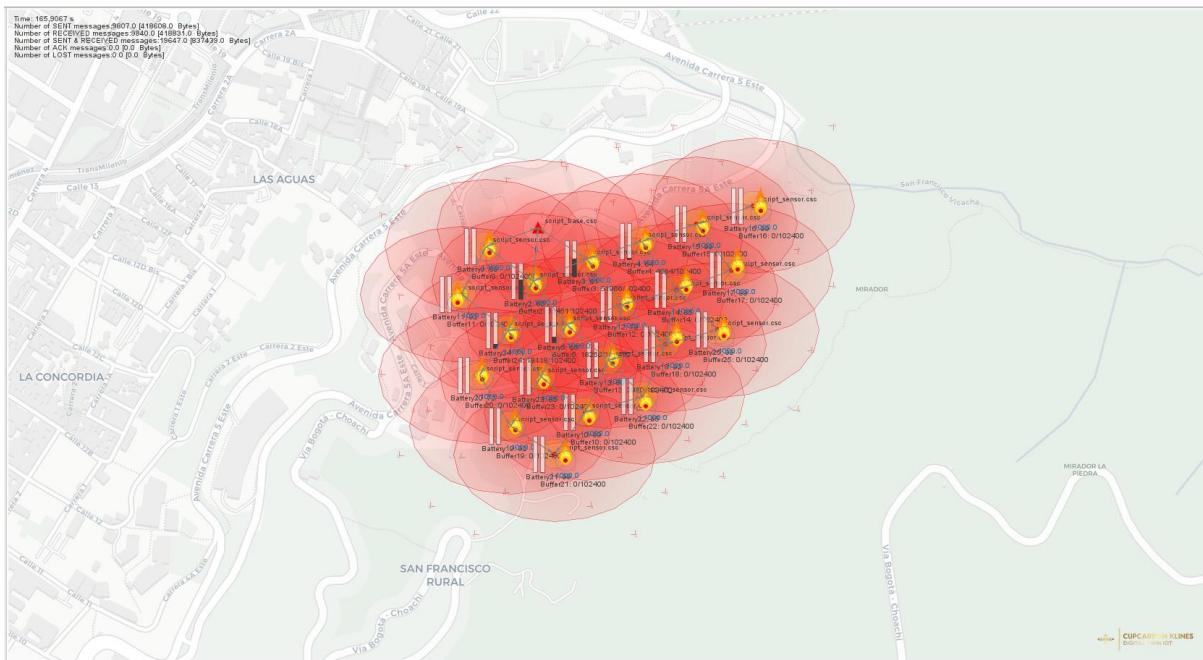


Ilustración 1: Topología de la red de sensores configurada con el estándar Zigbee (IEEE 802.15.4). Se observa que los nodos mantienen conectividad multi-salto adecuada, garantizando la propagación de mensajes desde los sensores hasta el nodo base dentro del área de cobertura definida.

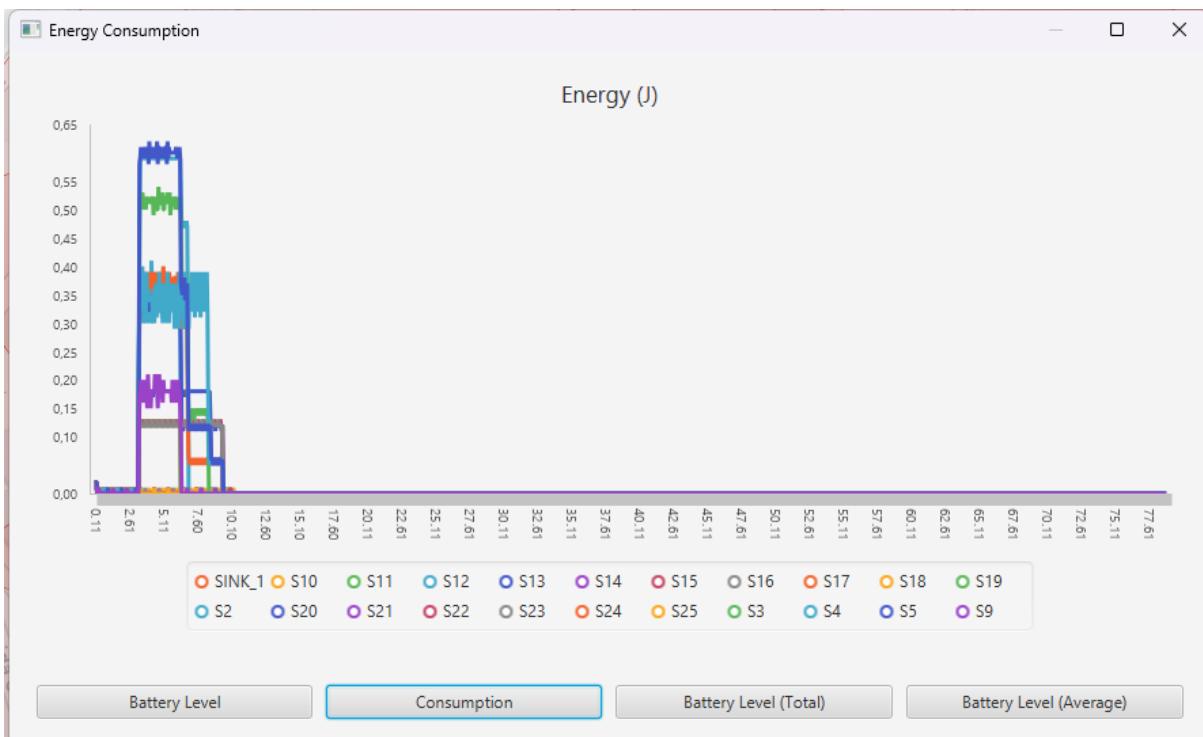


Ilustración 2: Gráficas de consumo energético obtenidas para la simulación con Zigbee. Se observa un consumo energético elevado durante los primeros segundos de la simulación, asociado a la alta frecuencia de transmisión configurada (10 ms). Posteriormente, el consumo deja de actualizarse debido a la finalización anticipada de la simulación, la cual no ocurre por agotamiento de batería ni por el límite máximo de mensajes enviados, sino por una interrupción del proceso de simulación.

```

S1 >> Alerta en: longitud -74.06319379806519 , latitud: 4.597102703392782
S1 >> Alerta en: longitud -74.06073153018951 , latitud: 4.599107886758212
S1 >> Alerta en: longitud -74.06274318695068 , latitud: 4.597829917816568
S1 >> Alerta en: longitud -74.0612518787384 , latitud: 4.59982975096161
S1 >> Alerta en: longitud -74.06236231327057 , latitud: 4.598599007785306
S1 >> Alerta en: longitud -74.06089782714844 , latitud: 4.5983111616498675
S1 >> Alerta en: longitud -74.0651497739972 , latitud: 4.59785130643135
S1 >> Alerta en: longitud -74.06154155731201 , latitud: 4.598899347998575
S1 >> Alerta en: longitud -74.06122505664825 , latitud: 4.597535824297491
S1 >> Alerta en: longitud -74.0612518787384 , latitud: 4.59982975096161
S1 >> Alerta en: longitud -74.06236231327057 , latitud: 4.598599007785306
S1 >> Alerta en: longitud -74.06319379806519 , latitud: 4.597102703392782
Simulation stopped!

End of Simulation.
4439.605 sec
Time: 165.9067 s
Number of SENT messages: 9807.0 [418608.0 Bytes]
Number of RECEIVED messages: 9840.0 [418831.0 Bytes]
Number of SENT & RECEIVED messages: 19647.0 [837439.0 Bytes]
Number of ACK messages: 0.0 [0.0 Bytes]
Number of LOST messages: 0.0 [0.0 Bytes]
Number of Marked Sensors: 2

```

Ilustración 3: Salida de la consola de CupCarbon correspondiente a la simulación con Zigbee. En ella se evidencian las transmisiones realizadas, el número de mensajes enviados y recibidos, y la condición de finalización de la simulación.

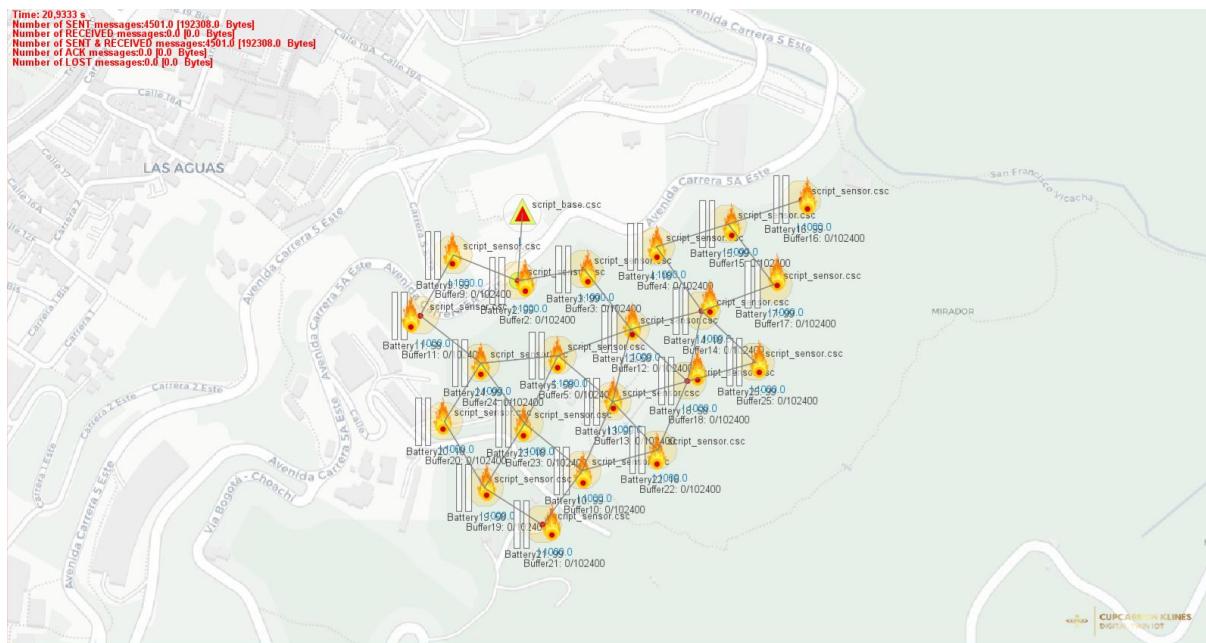


Ilustración 4: Topología de la red de sensores utilizando el estándar WiFi. La conexión directa y el mayor alcance permiten una comunicación eficiente entre nodos.

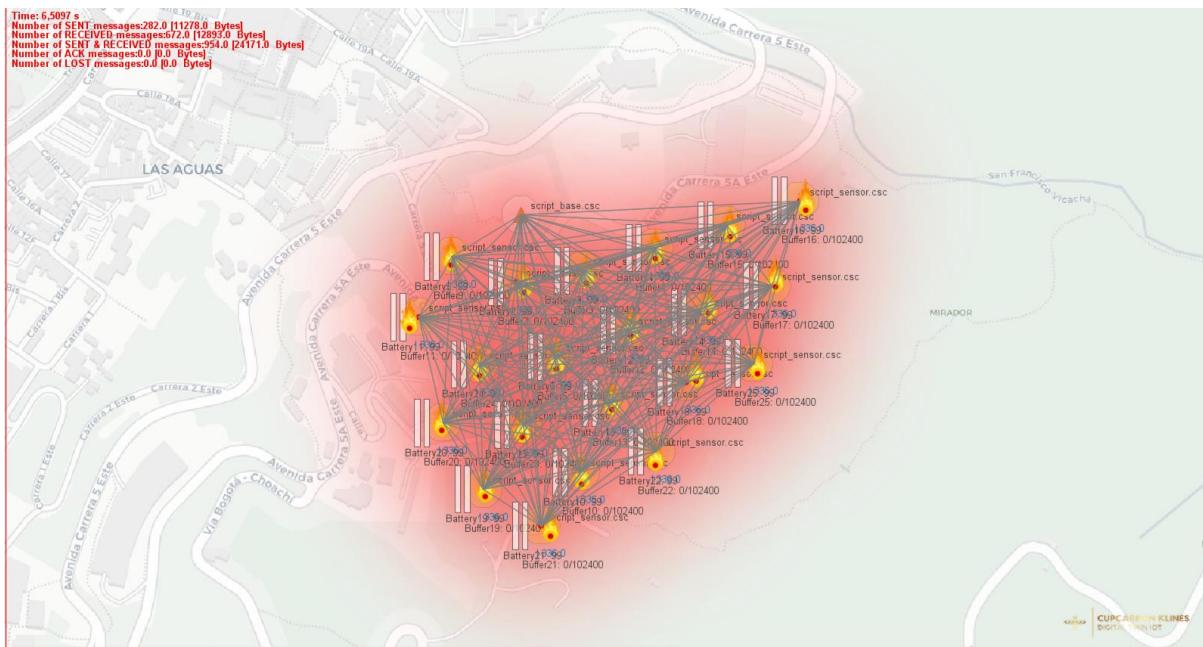


Ilustración 5: Configuración y conectividad de la red de sensores empleando el estándar LoRa. Se aprecia una conectividad adecuada con menos saltos intermedios, gracias al mayor alcance de comunicación característico de este protocolo por lo que todos logran conectarse directamente a la base.

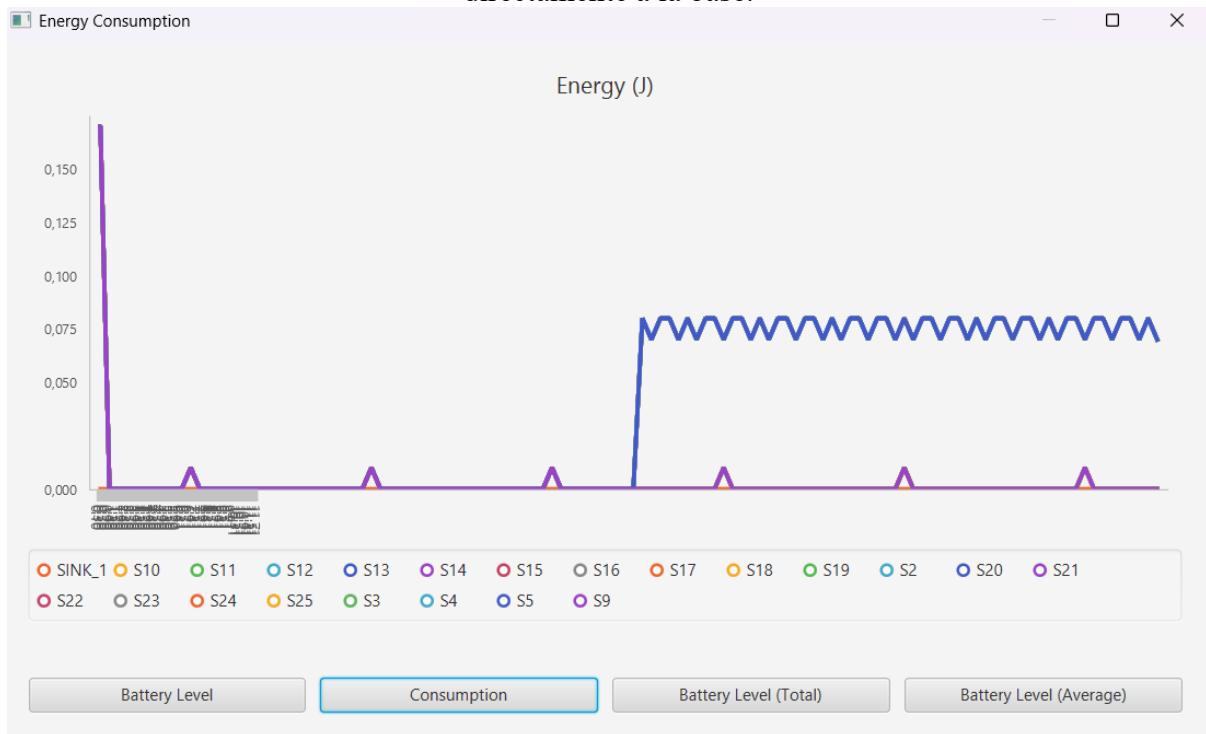


Ilustración 6: Gráficas de consumo energético obtenidas para la simulación con LoRa. Los resultados reflejan un consumo energético reducido y más uniforme entre los nodos sensores, lo que es consistente con un protocolo diseñado para comunicaciones de largo alcance y bajo consumo.

```

S1 >> Alerta en: longitud: -74.0611982345581 , latitud: 4.59985113952301
S1 >> Alerta en: longitud: -74.06359612941742 , latitud: 4.59787269499275
S1 >> Alerta en: longitud: -74.06386971473694 , latitud: 4.599070456576238
S1 >> Alerta en: longitud: -74.06148791313171 , latitud: 4.598920736559975
S1 >> Alerta en: longitud: -74.06067788600922 , latitud: 4.59912975319612
S1 >> Alerta en: longitud: -74.06004418296814 , latitud: 4.598332550211268
S1 >> Alerta en: longitud: -74.06314015388489 , latitud: 4.597124091954182
S1 >> Alerta en: longitud: -74.06268954277039 , latitud: 4.597851306377968
S1 >> Alerta en: longitud: -74.06230866909027 , latitud: 4.598621296346706
S1 >> Alerta en: longitud: -74.06117141246796 , latitud: 4.5975572128588915
S1 >> Alerta en: longitud: -74.0611982345581 , latitud: 4.59985113952301
S1 >> Alerta en: longitud: -74.06359612941742 , latitud: 4.59787269499275
Simulation stopped!

End of Simulation.
599.23 sec
Time: 11,8765 s
Number of SENT messages: 2962.0 [125982.0 Bytes]
Number of RECEIVED messages: 3361.0 [127984.0 Bytes]
Number of SENT & RECEIVED messages: 6323.0 [253966.0 Bytes]
Number of ACK messages: 0.0 [0.0 Bytes]
Number of LOST messages: 0.0 [0.0 Bytes]
Number of Marked Sensors: 0

```

Ilustración 7: Salida de la consola correspondiente a la simulación con LoRa. Se observa el correcto intercambio de mensajes de alerta y la finalización de la simulación sin agotamiento crítico de la batería, a pesar de presentarse eventos puntuales de saturación del buffer debido a la alta tasa de transmisión configurada.

Sección 3: Reflexión Técnica

Los resultados observados en las simulaciones pueden explicarse a partir de la interacción entre las limitaciones propias de la capa de dispositivos y las características de la capa de comunicación, las cuales determinan el comportamiento energético, la propagación de mensajes y la estabilidad general del sistema IoT.

Desde la capa de dispositivos, los nodos sensores utilizados en la simulación presentan restricciones típicas de los sistemas IoT, tales como capacidad limitada de batería, procesamiento y almacenamiento en buffer. Estas limitaciones se hicieron evidentes al configurar una frecuencia de transmisión elevada (10 ms) y un número considerable de nodos, lo que incrementó de forma significativa la carga de trabajo sobre los sensores encargados de reenviar mensajes. En particular, en el escenario con Zigbee, el nodo por el cual transitaban la mayoría de las alertas actuó como un punto de concentración del tráfico, lo que derivó en un consumo energético acelerado en comparación con el resto de los sensores. Este comportamiento es característico de redes con topología multi-salto, donde ciertos nodos asumen funciones adicionales de retransmisión que impactan directamente su consumo de energía.

Adicionalmente, la presencia de eventos de saturación del buffer en algunos nodos refleja una limitación estructural de la capa de dispositivos: cuando la tasa de llegada de mensajes supera la capacidad de procesamiento y almacenamiento temporal del nodo, se generan pérdidas o descartes de mensajes. Este fenómeno no solo afecta la confiabilidad de la comunicación, sino que también puede provocar comportamientos inesperados en la simulación, como finalizaciones anticipadas que no están directamente asociadas al agotamiento de la batería ni al número máximo de transmisiones configuradas.

Desde la capa de comunicación, las diferencias entre los protocolos evaluados explican gran parte de los comportamientos observados. Zigbee, basado en el estándar IEEE 802.15.4, está diseñado para redes de bajo consumo y baja tasa de datos, pero su funcionamiento en topologías multi-salto implica que el consumo energético no se distribuye de manera uniforme entre los nodos. Esto explica por qué, a pesar de ser un protocolo orientado a IoT,

ciertos sensores experimentaron un consumo significativamente mayor en los primeros segundos de la simulación. La interrupción anticipada del proceso impidió que se alcanzara un estado de agotamiento total de la batería, pero dejó en evidencia la sensibilidad del sistema a la concentración del tráfico.

En el caso de WiFi, aunque la topología mostraba conectividad directa entre los nodos y el nodo base, la simulación no logró propagar los mensajes de manera efectiva. Esto pone de manifiesto que, más allá del alcance visual que ofrece el simulador, la correcta operación de un protocolo depende de su configuración lógica y de compatibilidad con la arquitectura del sistema. La ausencia de tráfico efectivo impidió evaluar adecuadamente el consumo energético y resalta la importancia de la interoperabilidad y la correcta parametrización en la capa de comunicación.

Por su parte, LoRa mostró un comportamiento coherente con su diseño como tecnología de larga cobertura y bajo consumo energético. Al permitir enlaces directos entre los sensores y el nodo base, se redujo la necesidad de retransmisiones y, por ende, la carga sobre nodos intermedios. Esto se reflejó en un consumo energético más bajo y uniforme entre los sensores. Bajo estas condiciones, la simulación finalizó sin agotamiento crítico de batería, y es razonable suponer que, de no haberse presentado eventos de saturación del buffer, el sistema habría terminado únicamente por el límite máximo de mensajes configurado en los scripts.

En conjunto, los resultados evidencian que el desempeño energético y operativo de un sistema IoT no depende únicamente del protocolo de comunicación seleccionado, sino de la combinación entre la topología de red, la frecuencia de transmisión, las capacidades de los dispositivos y la gestión del tráfico en la capa de comunicación. Estos factores deben considerarse de manera integral durante el diseño del sistema, ya que una elección inadecuada puede llevar a cuellos de botella, consumo energético desigual y finalizaciones inesperadas, incluso cuando se emplean tecnologías específicamente diseñadas para IoT.