

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIE
Facultad de
Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electrónica y
Telecomunicaciones

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Evaluación de desempeño del proceso de asociación pasiva de
TSCH (PS-TSCH) en redes lineales con enlaces inestables

Autor: Raúl Almanza Ulloa

Tutor: Dr. Carlos Manuel García Algora

Santa Clara
Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIE
Facultad de
Ingeniería Eléctrica

Department of Electronics and
Telecommunication

TRABAJO DE DIPLOMA

Title: Performance evaluation of the TSCH passive association process (PS-TSCH) in linear networks with unreliable links

Author: Raúl Almanza Ulloa

Thesis Director: Dr. Carlos Manuel García Algora

Santa Clara
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

PENSAMIENTO

“No existen preguntas sin respuesta, solo preguntas mal formuladas.”

“Laurence Fishburne en Matrix”

DEDICATORIA

A mi familia, gracias por su paciencia y apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por soportarme todos estos años, gracias por la confianza que siempre tuvieron en mí.

A mis compañeros de cuarto por su ayuda.

A Luis por despertarme cada mañana que había turno a 1ra

RESUMEN

La “Internet de las cosas” (IoT, por sus siglas en inglés) se basa en gran medida en las LLNs (del inglés, “*Low-power and Lossy Networks*”) las cuales recopilan datos del mundo real y los transmiten para su posterior análisis y procesamiento. Además, las LLNs hacen posible que los dispositivos IoT se conecten a la Internet. Las aplicaciones de la IoT con LLNs exigen protocolos de bajo consumo de energía, computacionalmente ligeros que puedan ejecutarse en dispositivos de gama baja con comunicación y capacidades de procesamiento limitada. Con la aparición en los últimos años de soporte de hardware para el trabajo a múltiples frecuencias, los protocolos MAC para las LLNs han experimentado una evolución hacia la operación multicanal, para aumentar la razón de datos y disminuir los efectos de la interferencia y el desvanecimiento multipunto. Han sido propuestos un número considerable de protocolos de “Control de Acceso al Medio” (MAC, por sus siglas en inglés) multicanal para LLN. Entre ellos destaca el protocolo propuesto por la IEEE en su estándar IEEE 802.15.4, TSCH (del inglés, “*Time-Slotted Channel Hopping*”). En la presente investigación se analiza dicho protocolo MAC teniendo en cuenta diferentes grados de inestabilidad de los enlaces. Para lograr este objetivo se utilizan implementaciones de TSCH en el sistema operativo *Contiki-NG* las cuales se corren en el simulador COOJA, integrado a dicho sistema operativo sobre un dispositivo LLN genérico. Se evalúa el desempeño de TSCH en una configuración de red lineal compuesta de 1 a 6 nodos no asociados y un coordinador, variando la confiabilidad del enlace desde un 60% a un 100%. Se van a tener en cuenta para la evaluación de desempeño: el tiempo y la energía consumidos en la formación de la red TSCH.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO.....	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN	iv
TABLA DE CONTENIDOS	v
LISTA DE ABREVIATURAS	vii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. PROCESO DE ASOCIACIÓN PASIVA (PS-TSCH) DEL MODO TSCH DEL ESTÁNDAR IEEE 802.15.4.....	5
1.1 IoT. Descripción y aplicaciones.	5
1.1.1 LLN: estándares y protocolos más importantes.....	6
1.1.2 Modos de operación.	7
1.2 TSCH	8
1.2.1 Programación, división por ranuras de tiempo y bloques de ranuras en TSCH....	8
1.2.2 Formación de una Red TSCH.....	9
1.2.3 Exploración pasiva con 6TiSCH	10
1.2.4 Trabajos relacionados con la formación de la red TSCH.....	13
1.2.5 PS-TSCH en redes lineales.....	14
1.3 Conclusiones parciales del capítulo.	15
CAPÍTULO 2. SIMULACIÓN DE PS-TSCH CON ENLACES INESTABLES EN CONTIKI-NG	16
2.1 Selección de tecnologías	16

2.1.1 Sistema operativo Contiki-NG y simulador COOJA.....	16
2.1 Escenario de simulación.....	20
2.1.1 Configuración de la red.....	21
2.1.2 Tiempo de formación de la red lineal.	21
2.1.3 Consumo de energía en el proceso de formación de la red lineal TSCH.....	22
2.3 Conclusiones parciales del capítulo.	23
CAPÍTULO 3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	24
3.1 Tiempo consumido en la formación de la red.....	24
3.2 Comparación entre las simulaciones y el modelo teórico para el tiempo de formación de la red.....	25
3.3 Energía consumida en el proceso de formación de la red.....	26
3.4 Conclusiones parciales del capítulo.	28
CONCLUSIONES	29
RECOMENDACIONES	31
BIBLIOGRAFÍA.....	32

LISTA DE ABREVIATURAS

WSN: Wireless Sensor Network

MAC: Medium Access Control

RDC: Radio Duty Cycling

RPL: Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks

LLN: Low-power and Lossy Networks

IoT: Internet of things

CSMA-CA: Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance

6LoWPAN: IPv6 over Low-power Wireless Personal Area Networks

CoAP: Constrained Application Protocol

TSCH: Time-Slotted Channel Hopping

PS-TSCH: Pasive Scan Time-Slotted Channel Hopping

IETF: Internet Engineering Task Force

COOJA: ContikiOS Java Simulator

INTRODUCCIÓN

Se podría definir el Internet de las cosas, (IoT, por sus siglas en inglés) [1], como la consolidación a través de la red de redes de una "red" que alojase una gran multitud de objetos o dispositivos; es decir, tener conectada a esta todas las cosas como podrían ser vehículos, electrodomésticos, dispositivos mecánicos, o simplemente objetos tales como calzado, muebles, maletas, dispositivos de medición, biosensores, o cualquier objeto de la vida diaria y la industria. Debido a esto, numerosas iniciativas se ponen en marcha para intentar conjugar protocolos que sirvan como estándar y de alguna manera tengan en cuenta las características y limitaciones de los sistemas interconectados que forman parte activa de la IoT.

En la actualidad no hay una definición específica o estándar de la arquitectura de la IoT. Algunos investigadores definen la IoT como un modelo que abarca a las tecnologías de comunicación inalámbrica como las redes de sensores inalámbricos, redes móviles y actuadores, con cada uno de los elementos denominados “objeto o cosa” y con una dirección única [2].

La tecnología inalámbrica es la vía fundamental por la que los “objetos inteligentes” se comunican entre ellos y hacia Internet. En este sentido, cobran importancia las redes de sensores inalámbricos (WSN) como la tecnología que permite la escalabilidad de la IoT y con la funcionalidad suficiente para permitir su integración con la arquitectura actual de Internet, tal como se evidencia en [3] [4] y [5]. La IoT se basa en gran medida en las LLNs (del inglés, “*Low-power and Lossy Networks*”) las cuales recopilan datos del mundo real y los transmiten para su posterior análisis y procesamiento. Además, las LLNs hacen posible que los dispositivos IoT se conecten a la Internet. Las aplicaciones de la IoT con LLNs exigen protocolos de bajo consumo de energía, computacionalmente ligeros que puedan ejecutarse en dispositivos de gama baja con comunicación y capacidades de procesamiento limitada. Además, estos protocolos deben proporcionar a la red fortaleza ante condiciones de interferencia, *jamming* y coexistencia con sistemas que utilicen mayor potencia de radio.

Con la aparición en los últimos años de soporte de hardware para el trabajo a múltiples frecuencias, los protocolos de Control de Acceso al Medio (MAC, por sus siglas en inglés) para las LLNs han experimentado una evolución hacia la operación multicanal [6], para aumentar la razón de datos y disminuir los efectos de la interferencia y el desvanecimiento multipunto. Han sido propuestos un número considerable de protocolos MAC multicanal para LLN [7] [8] [9] [10]. Entre ellos destaca el protocolo propuesto por la IEEE en su estándar IEEE 802.15.4, TSCH (del inglés, “*Time-Slotted Channel Hopping*”) [11]. TSCH crea una red de malla sincronizada capaz de entregar paquetes de datos de una manera confiable y oportuna. El estándar define un mecanismo de escaneo para permitir que los nodos detecten la presencia de una red TSCH y asociarse a ella.

Otra tecnología clave para la creación de redes IP en los dispositivos inalámbricos es “IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks” (6LoWPAN), un estándar que especifica cómo se transportan paquetes IPv6 sobre IEEE 802.15.4 [12]. Por su lado, el protocolo de enrutamiento “*IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks (RPL)*” se presenta como el principal candidato en las redes de bajas potencias y pérdidas, que son las principales componentes en la próxima generación del Internet de las cosas [13].

Un aspecto fundamental dentro del funcionamiento de las LLNs es el tiempo que consume el despliegue de las mismas. En este sentido, el tiempo de asociación de los nodos a la red, a los diferentes niveles de la pila de protocolos juega un papel importante. Para garantizar la comunicación de los protocolos de alto nivel dentro de la pila de protocolos, primero debe establecerse la comunicación a nivel MAC. Por esta razón el tiempo de formación de la red a nivel de TSCH tiene un impacto significativo en el despliegue de la red. El estándar propone un algoritmo de asociación denominado escaneo pasivo [11], para el que se utiliza el acrónimo PS-TSCH en el resto del documento. El estudio del desempeño de PS-TSCH es importante para identificar sus debilidades y fortalezas; permitiendo así su mejora y actualización.

A partir de lo expuesto hasta el momento, los autores de esta investigación proponen como **interrogante científica:** ¿Cuál es el comportamiento de la red utilizando PS-TSCH con enlaces inestables para un número de dispositivos y canales limitados?

Para dar solución a la interrogante científica, se define como **objetivo general**: Evaluar el desempeño de PS-TSCH en la formación de la red TSCH en presencia de enlaces inestables usando experimentos de simulación.

A fin de alcanzar el objetivo general se proponen los siguientes **objetivos específicos**:

1. Describir el modo TSCH perteneciente al estándar IEEE 802.15.4, con énfasis en el mecanismo de formación de las redes lineales.
2. Describir el mecanismo de asociación pasiva (PS-TSCH) para el modo TSCH.
3. Diseñar escenarios de simulación para el análisis del desempeño.
4. Describir el desempeño de PS-TSCH con enlaces inestables a partir de los resultados obtenidos en la simulación para redes lineales.

Los objetivos específicos tienen como propósito dar respuesta a las siguientes **preguntas científicas**:

1. ¿Cuáles son las características del modo TSCH del estándar IEEE 802.15.4?
2. ¿Cuáles son las características principales de PS-TSCH?
3. ¿Qué experimentos permiten evaluar el desempeño de PS-TSCH?
4. ¿Cuál es el desempeño de PS-TSCH en los escenarios de simulación diseñados?

Para la simulación del protocolo TSCH se utiliza el sistema operativo *Contiki-NG* y el simulador COOJA.

La novedad científica y los principales aportes de esta investigación radican en la implementación y evaluación del desempeño del protocolo TSCH variando los niveles de confiabilidad del enlace.

Organización del informe.

El informe de investigación está compuesto por una introducción, capitulo, conclusiones, recomendaciones para investigaciones futuras en el tema, referencias bibliográficas y anexos:

Capítulo 1: Se explican conceptos básicos tales como IoT, LLNs y sus protocolos MAC multicanal. Se realiza una breve descripción del modo TSCH del estándar IEEE 802.15.4 y un análisis del proceso de asociación pasiva PS-TSCH.

Capítulo 2: Se analizan las tecnologías a utilizar y se describen brevemente las principales características la herramienta COOJA, usada en las tareas de simulación. Por último, se describen detalladamente los escenarios de simulación.

Capítulo 3: Se discuten los resultados de las simulaciones diseñadas en el capítulo 2. Se evalúa el desempeño de PS-TSCH según los datos recolectados en los procesos de simulación.

CAPÍTULO 1. PROCESO DE ASOCIACIÓN PASIVA (PS-TSCH) DEL MODO TSCH DEL ESTÁNDAR IEEE 802.15.4

En el presente capítulo se da una breve introducción a los conceptos de la IoT así como las LLN y algunos de sus estándares y protocolos más importantes. Se describe el protocolo TSCH y el algoritmo de asociación PS-TSCH, haciendo énfasis en su funcionamiento y desempeño en redes lineales.

1.1 IoT. Descripción y aplicaciones.

La IoT es un nuevo paradigma de Internet en el que todas las cosas están interconectadas. Cosas como robots, electrodomésticos, teléfonos móviles, en fin, multitud de objetos diferentes [14]. La gran cantidad de cosas en la red de la IoT genera lo que se denomina hiperconectividad [14]. La IoT se divide en cuatro capas: la capa de percepción, la capa de redes y comunicación, la capa de servicios, y la capa de aplicaciones. La implementación de la IoT trae consigo varios retos importantes tales como: garantizar la capacidad de dar cobertura de red en un tiempo suficientemente corto ante la petición de un servicio y mantener la seguridad y privacidad de los datos personales. Este tipo de red abre nuevas aplicaciones con ámbitos tan diversos como casas inteligentes, automóviles autónomos, se utiliza en la agricultura para medir condiciones ambientales y el estado de los cultivos, en los procesos de producción para automatizarlos y controlarlos, en la salud y el bienestar de las personas, etc.

La IoT se basa en gran medida en las LLNs [15]. Las aplicaciones de la IoT con LLNs exigen protocolos de bajo consumo de energía, computacionalmente ligeros que puedan ejecutarse en dispositivos de gama baja con comunicación y capacidades de procesamiento limitadas.

1.1.1 LLN: estándares y protocolos más importantes.

Se le llama LLN a un conjunto de dispositivos, comúnmente alimentados por baterías, que se despliegan en posiciones inicialmente desconocidas entre ellos y se comunican entre sí usando enlaces inalámbricos. Forman topologías de árbol, malla o estrella y utilizan tramas cortas y bajas razones de datos (*e.g.* 250Kbps). En la Figura 1.1 pueden apreciarse algunos de los protocolos habilitados para IPv6 en la arquitectura de las LLNs utilizando como referencia el modelo TCP/IP.

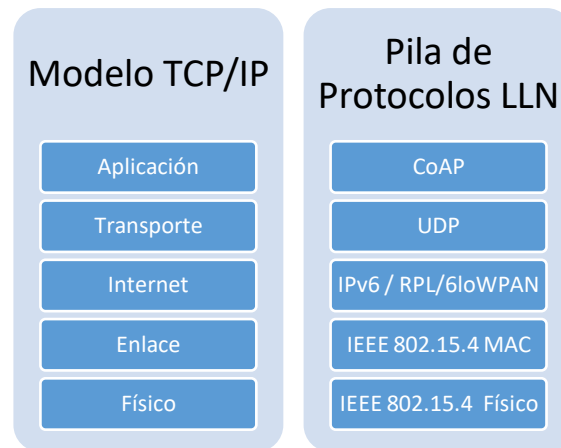


Figura 1. 1 Protocolos de importancia habilitados para IPv6 en la arquitectura de las LLNs en relación con el modelo TCP/IP

Se utilizan diferentes tipos de protocolos y estándares con la característica común de que son de bajo consumo. Entre estos se encuentran: el Protocolo de Aplicación Restringida (CoAP, por sus siglas en inglés) [16] es un protocolo de transferencia web diseñado específicamente para nodos con poca potencia y redes de bajos recursos. Es utilizado en aplicaciones punto a punto como las redes inteligentes de distribución de energía y la automatización de viviendas. Este protocolo brinda un modelo de interacción solicitud/respuesta entre los puntos finales de la aplicación, interactúa fácilmente con HTTP en la integración con la Web, cumple los requisitos requeridos para LLN tales como soporte para multidifusión, gastos energéticos muy bajos y simplicidad para entornos restringidos.

RPL [15], es el protocolo de enrutamiento utilizado en las redes IPv6 de baja potencia estandarizadas por la *Internet Engineering Task Force* (IETF). Es un protocolo de enrutamiento de vector de distancia orientado que crea un árbol de ruteo en forma de grafo acíclico orientado y dirigido (DODAG, por sus siglas en inglés). Como se ha dicho

anteriormente, el consumo de energía en las LLNs es una cuestión primordial. La interfaz de radio de los dispositivos se encuentra desactivada la mayor parte del tiempo con el fin de ahorrar energía. También, al ser inalámbricos los enlaces, no son confiables. 6LoWPAN [17] formaría parte de la capa de red, sirviendo como capa de adaptación entre la capa MAC de IEEE 802.15.4 y la capa de red de IPv6. En la capa de transporte vendría representado el protocolo UDP, el cual puede ser comprimido mediante el protocolo 6LoWPAN ya que en este también se contempla dicha función.

1.1.2 Modos de operación.

El estándar IEEE 802.15.4 incorpora diferentes modos de operación para LLN tales como:

- *Deterministic & Synchronous Multi-channel Extension* (DSME) [18]
- *Low Latency Deterministic Network* (LLDN) [19]
- *Time Slotted Channel Hopping* (TSCH) [20]
- *Radio Frequency Identification Blink* (RFID Blink) [21]
- *Asynchronous Multi-Channel Adaptation* (AMCA) [22]

Cada uno de estos modos de operación tiene características propias que benefician de diferentes formas a las distintas aplicaciones de red.

- DSME fue diseñado para aplicaciones con requisitos de alta disponibilidad, eficiencia, escalabilidad y robustez.
- LLDN se enfoca en aplicaciones con requisitos de poca latencia tales como robots, autos inteligentes, etc.
- TSCH está pensado principalmente para entornos industriales donde la adaptabilidad y robustez frente a interferencia tiene que ser alta y el consumo de energía tiene que ser reducido, sin embargo, el diseño de TSCH brinda la flexibilidad suficiente para ser utilizados en aplicaciones no industriales.
- El modo *RFID Blink* ha sido diseñado para la comunicación con dispositivos a partir de un identificador que cada uno posee. Se utiliza para aplicaciones de identificación de objetos o personas, localización o seguimiento de los mismos.
- AMCA se utiliza en redes de gran tamaño y dispersión geográfica tales como las redes para *smart utility*, redes de monitorización de infraestructuras y redes de control de proceso.

1.2 TSCH

TSCH [20] es un modo de operación del estándar IEEE 802.15.4 [11] definido para la capa MAC de LLNs, ubicado bajo la pila de protocolos habilitados para IPv6 en la arquitectura de las LLNs (ver figura 1.1). TSCH utiliza comunicaciones sincronizadas en el tiempo con saltos de canal en frecuencia con el fin de dotar a la red de una mayor robustez frente a fenómenos espectrales tales como interferencias o desvanecimiento por multitrayecto (del inglés, “*multipath fading*”). Este modo de operación dota al sistema de una mayor fiabilidad, ya que, dependiendo del tipo de entorno, estos fenómenos pueden llegar a destruir completamente las señales en el receptor. Fue diseñado para permitir que las LLNs soportasen diferentes tipos de aplicaciones, incluyendo las industriales. El tiempo de formación de la red es muy importante a la hora de su despliegue e impacta directamente en la cantidad de energía que consumen los nodos. Gracias al salto de canal TSCH es una buena solución para ambientes con difíciles condiciones de trabajo, como los ambientes industriales, donde suele haber grandes entornos de despliegue con equipamiento metálico, lo cual es causa de desvanecimiento e interferencia multitrayecto, haciendo inviables las soluciones basadas en un solo canal.

1.2.1 Programación, división por ranuras de tiempo y bloques de ranuras en TSCH

El funcionamiento de una red TSCH está basado en el sincronismo. Para lograr dicho sincronismo el tiempo se divide en ranuras lo suficientemente largas para que un nodo envíe una trama MAC de tamaño máximo a otro y reciba un acuse de recibo (ACK, por sus siglas en inglés) de éste que indique la recepción satisfactoria. Cada ranura puede ser programada para transmitir, recibir o dormir. Las ranuras programadas para transmitir o recibir son llamadas “ranuras activas”, mientras que las “ranuras inactivas” son ranuras vacías en las cuales ni transmite ni recibe datos. Durante el tiempo correspondiente a este último tipo de ranuras, el radio del nodo se mantiene apagado, utilizando de esta manera RDC (del inglés, “*Radio Duty Cycling*”)

El estándar no define la duración de una ranura pero normalmente con radios compatibles con IEEE.802.15.4 que operan en la banda de 2,4 GHz, una trama MAC máxima (127 bytes) tarda 4 ms en ser transmitida y un ACK tarda 1 ms. De esta forma, la duración típica de una ranura es de 10 ms, lo que deja 5 ms libres para preparación de la interfaz de radio, procesamiento de la trama y operaciones de seguridad. Las ranuras son agrupadas en bloques de ranuras. Un bloque de ranuras se repite continuamente en el tiempo. TSCH no impone un

tamaño del bloque de ranuras. Dependiendo de las necesidades de la aplicación, estos tamaños pueden variar de 10 a 1000 ranuras. Cuanto más corto sea el bloque de ranuras, más frecuentemente se repetirá una ranura, resultando en un mayor ancho de banda disponible para el enlace que use esa ranura, aunque también en un mayor consumo de energía.

Para aprovechar las capacidades multicanal de TSCH, a cada ranura activa se le asigna un desplazamiento de canal y un desplazamiento de tiempo. El desplazamiento de tiempo define su posición dentro de un bloque de ranuras y el desplazamiento de canal denotado como “*CHoffset*”, es usado para determinar el canal que se utilizará en cada ocurrencia de la ranura, indicado como “*CHcom*”, usando la ecuación (1.1):

$$CHcom = V[(ASN + CHoffset) \bmod Nch], \quad (1.1)$$

donde *V* es un vector que contiene los canales disponibles para ser utilizados por la red, *ASN* es el Número Absoluto de Ranura, un contador incremental que almacena el número de ranuras que han transcurrido desde la puesta en marcha de la red; *Nch* es la longitud de *V* (por tanto, el número de canales disponibles), y ***mod*** es utilizado para indicar una operación de módulo.

La programación (del inglés, “*schedule*”) de los nodos se compone de bloques de ranuras que contienen los enlaces que se están utilizando para la comunicación. Las ranuras pueden ser compartidas o dedicadas. Las ranuras dedicadas establecen un enlace unidireccional en el que solo el nodo (es decir, la fuente) puede transmitir. Se puede programar más de un nodo como receptor de un enlace en una ranura dedicada, de manera que, por ejemplo, los paquetes de difusión de la capa de enlace se puedan enviar utilizando una sola transmisión. Las comunicaciones sobre las ranuras compartidas siguen una estrategia de Acceso múltiple con Detección de Portadora y Evitación de Colisiones (CSMA-CA, por sus siglas en inglés). Para mantener la estrecha sincronización que necesita TSCH y distribuir la información correspondiente a programación de la red, seguridad, etc. el protocolo utiliza unas tramas denominadas *Enhanced Beacon* (EB). Además, la información de sincronismo se puede incorporar en cualquier trama enviada a nivel MAC.

1.2.2 Formación de una Red TSCH

Una red TSCH se forma cuando un nodo (denominado coordinador) notifica la presencia de la red enviando EBs. En este punto, la red está compuesta únicamente por el coordinador. Un nodo puede comenzar a transmitir EBs solo si es el coordinador de una red PAN o si está asociado a una red PAN ya establecida. Los nodos intentan asociarse a la red escuchando

sucesivamente en todos los canales disponibles, hasta que escuchen un EB desde el coordinador o desde un nodo ya asociado a la red, como se muestra en la Figura 1.2. En la topología de red lineal general el diámetro de la red, K , coincide con el número de nodos que intentan asociarse (excluyendo el coordinador), N (es decir, $K = N$). Es importante destacar que los nodos que se asocian a la red pueden comenzar a enviar sus propios EBs.

Para cada nodo, la línea de tiempo es mostrada en barras horizontales para el canal en el que el nodo se está comunicando. Dado que el nodo 0 está ejecutando RDC desde el inicio de la red, solo enciende la radio cuando va a transmitir un EB. Los EBs transmitidos están representados en barras negras en la parte superior del canal que usa la radio, y los EBs recibidos se representan como barras verticales verde claro.

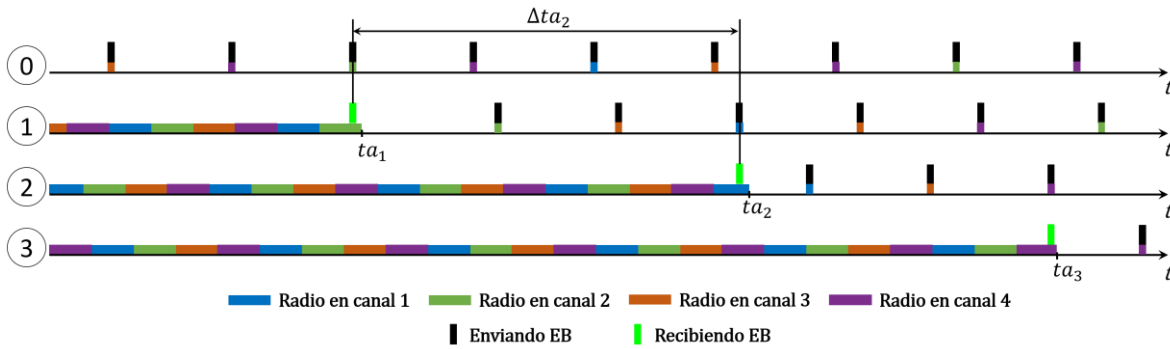


Figura 1. 2 Ejemplo de aplicación del proceso de asociación en una red lineal de diámetro $N = K = 3$ utilizando PS-TSCH

1.2.3 Exploración pasiva con 6TiSCH

A este proceso se le va a llamar en todo el documento por el término de PS-TSCH (del inglés, “*Passive Scan TSCH*”) [23]. Supongamos que la red utiliza una configuración mínima de 6TiSCH [24], que define una programación simple pero efectiva para todos los nodos. Al inicio de la red, el nodo coordinador crea una programación de configuración mínima de 6TiSCH. Este modo mínimo de operación utiliza un solo bloque de ranuras el cual tiene una ranura compartida activa común a todos los nodos. Sólo hay una única celda programada en el bloque de ranuras. Esta celda puede ser programada en cualquier desplazamiento de ranura o canal dentro del bloque de ranuras. La ubicación de esa celda en la programación se anuncia en el EB. Un nodo puede usar la celda programada para transmitir/recibir todo tipo de tramas de capa de enlace. Los EBs se envían a la dirección de difusión de la capa de enlace y no se envía ACK en respuesta a ellos. El algoritmo 1.1 presentado en [23] describe el proceso de asociación utilizando PS-TSCH y se presenta su diagrama de flujo en la Figura 1.3. Los nodos

fuera de la cobertura de radio del coordinador deben esperar a que los nodos intermedios se asocien antes de poder recibir los EBs por sí mismos.

Algoritmo 1.1 Algoritmo de asociación de PS-TSCH.

input: V: Vector de canales disponibles

Tchscan: Período de escaneo de canales

output: Programación TSCH

```
1:  $I_c \leftarrow (\text{número entero aleatorio}) \bmod N_{ch}$ 
2:  $CH_{scan} \leftarrow V[I_c]$ 
3: configurar el temporizador de escaneo Tchscan
4: while no están asociados do
5:   if el temporizador de escaneo ha caducado, then
6:     reiniciar el temporizador de escaneo
7:      $I_c \leftarrow (I_c + 1) \bmod N_{ch}$ 
8:      $CH_{scan} \leftarrow V[I_c]$ 
9:   end if
10:  if se recibe EB then
11:    asociar
12:  end if
13: end while
14: return
```

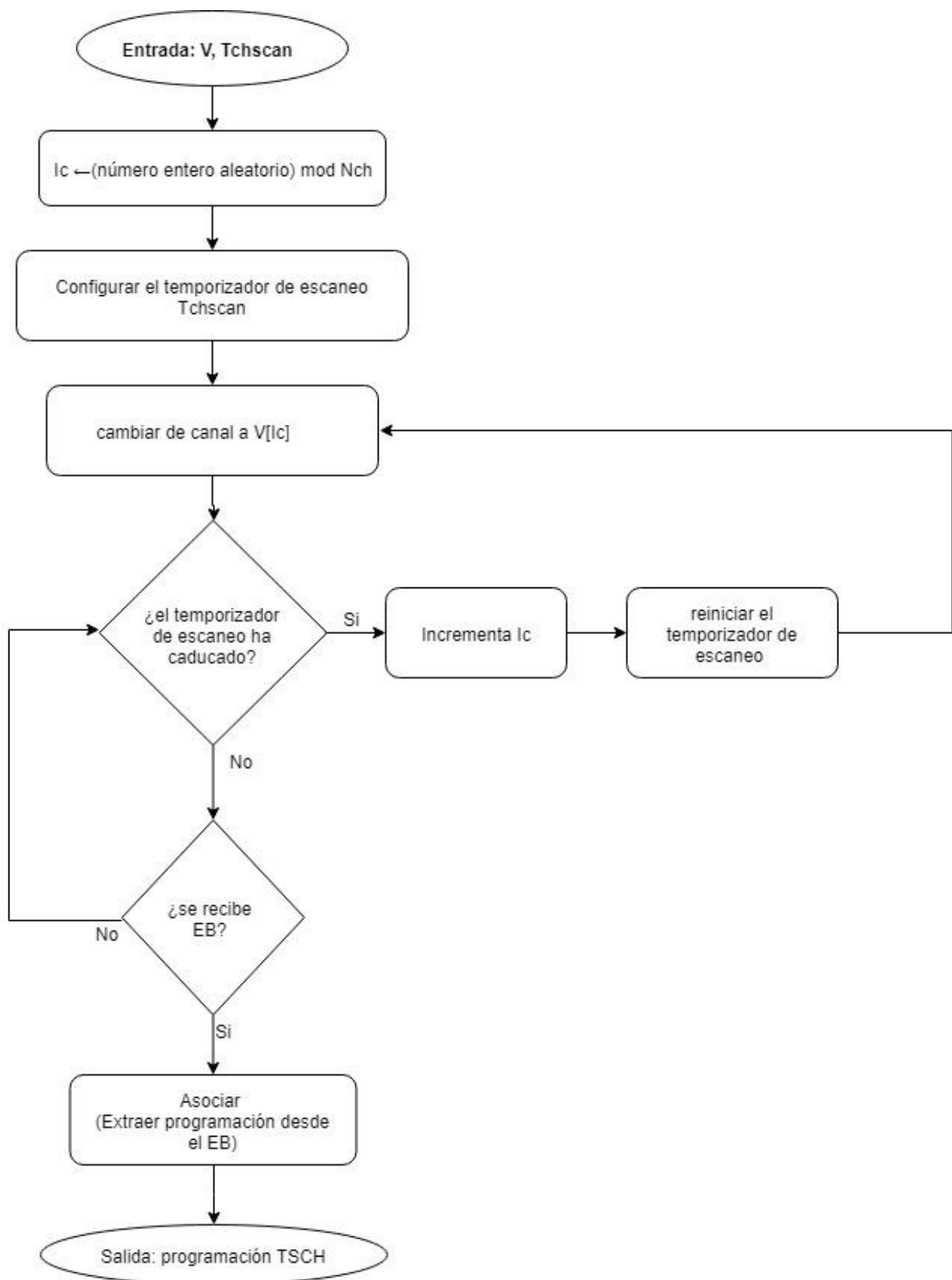


Figura 1. 3 Diagrama de flujo del algoritmo de asociación para PS-TSCH

1.2.4 Trabajos relacionados con la formación de la red TSCH.

La IETF presentó un documento [24] en el que se detallan algunos de los problemas y objetivos del mecanismo TSCH, entre ellos la formación y el mantenimiento de la red. El grupo de trabajo 6TiSCH también ha puesto todo su empeño en mejorar el mecanismo para hacer posible el uso de IPv6 en redes TSCH. Sin embargo, aún no se ha propuesto un mecanismo definitivo que mejore el proceso de unión de la red o la relación entre RPL y TSCH.

Vogli y colaboradores proponen en [25] dos algoritmos denominados *Random Vertical filling* (RV) y *Random Horizontal filling* (RH) que diseminan los EBs en tiempo y frecuencia para aumentar las probabilidades de que un nuevo nodo reciba un EB y disminuir el tiempo de asociación de nuevos nodos a una red ya formada. Estos algoritmos se modifican en [26], incorporando coordinación entre los nodos que envían EBs para la programación de las ranuras para ese propósito, proponiendo así dos nuevos algoritmos denominados *Enhanced Coordinated Vertical Filling* (ECV) y *Enhanced Coordinated Horizontal Filling* (EHV).

Duy y colaboradores en [27] y [28] llevan a cabo otro análisis sobre los problemas de los grandes retrasos en la conexión a la red y proponen un nuevo esquema de planificación del bloque de ranuras para mejorar la eficiencia del mecanismo de unión TSCH. Esta solución permite que un dispositivo determine dinámicamente el número de mensajes de sincronización que se necesitan.

Guglielmo y colaboradores en [29] evalúan un algoritmo de anuncio TSCH al cual denominan *Random-based Advertisement Algorithm*, el cual se basa en la transmisión aleatoria de mensajes de sincronización. Sus resultados muestran que el tiempo de unión de un nodo está influenciado principalmente por el número de canales que se utiliza para la transmisión de EBs en los nodos que ya forman parte de la red.

García Algora y colaboradores presentan en [23] un algoritmo basado en el principio de *rendezvous* paralelo para la asociación del modo de operación TSCH, llamado PRV-TSCH. El algoritmo utiliza el principio de *rendezvous* paralelo para aprovechar de manera eficiente el tiempo en el que los nodos no asociados mantienen la radio encendida escaneando los diferentes canales disponibles en busca de EBs. Estos nodos envían periódicamente tramas llamadas *Rendezvous Beacons* (RB) que contienen información que permite al receptor del RB predecir qué canal estará escaneando el transmisor del RB en cualquier momento futuro.

De esta manera, desde que el primer nodo se asocia a la red, este puede mandar inmediatamente EBs en los canales que están escaneando los vecinos de los que recibió un RB en el pasado, disminuyendo de forma apreciable el tiempo que demoran los nodos en formar la red y por tanto la cantidad de energía que consumen en el proceso.

En esta investigación nos enfocamos solamente en lo que define el estándar ya que:

- No depende de un algoritmo de programación de EBs que no está estandarizado.
- Es un mecanismo básico sin necesidad de envío de paquetes extra y que violan el estándar cuando aclara que no se deben enviar tramas aparte de los EBs durante el escaneo de la red (como es el caso de PRV-TSCH).
- Es el que está definido en el estándar para ser soportado por todos los dispositivos, independientemente del fabricante, por razones de interoperabilidad.

1.2.5 PS-TSCH en redes lineales.

La Figura 1.4 muestra un ejemplo de una topología de red lineal compuesta por un coordinador (nodo 0) y tres nodos tratando de asociarse a la red. En la topología de red lineal general, el diámetro de la red coincide con el número de nodos que intentan asociarse (excluyendo el coordinador). Aquí, el nodo 1 solo puede escuchar el nodo 0 y al nodo 2; a su vez, el nodo 2 solo escucha al nodo 1 y al nodo 3, y el nodo 3 solo puede escuchar las transmisiones provenientes del nodo 2.

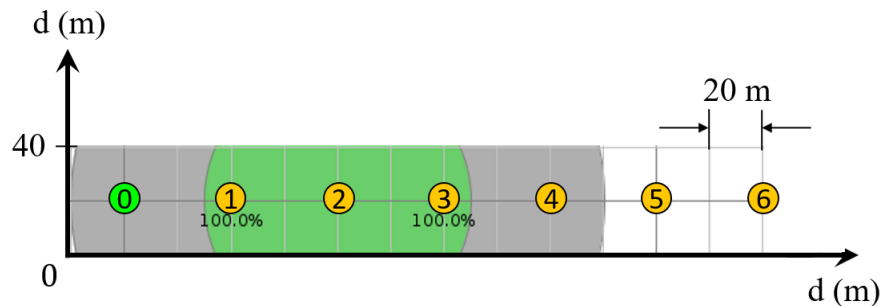


Figura 1. 4 Ejemplo de una red lineal

Asumiendo que ta_j es el tiempo requerido para que un nodo se asocie a un único coordinador de red TSCH. Entonces, tras desarrollar varias ecuaciones, planteadas en la investigación [23], se obtiene que: el valor esperado de tiempo para formar una red lineal de diámetro $K = N$, indicada como tf_N , se puede expresar como:

$$E\{tf_N\} = E\{ta_N\} = N \cdot E\{ta_1\}. \quad (1.2)$$

Para la presente investigación es necesario tener en cuenta la inestabilidad de los enlaces en el modelo matemático propuesto por [23]. Si se define R_e como la razón de confiabilidad del enlace, lo que en la asociación se traduce en la probabilidad de que un EB sea recibido con éxito, entonces el valor esperado del tiempo de formación de la red quedaría expresado como:

$$E\{tf_N\} = E\{ta_N\} = N \cdot \frac{E\{ta_1\}}{R_e}. \quad (1.3)$$

1.3 Conclusiones parciales del capítulo.

Con el avance que han experimentado las LLNs, debido al desarrollo del hardware con soporte para múltiples frecuencias, los protocolos MAC para LLNs han experimentado una evolución hacia la operación multicanal. La transmisión de datos en paralelo a partir del uso de múltiples canales y las técnicas de diversidad de frecuencia permiten aumentar la razón de transferencia exitosa de la red y disminuir los efectos de interferencia. Estas redes tienen severas restricciones asociadas en cuanto a la disponibilidad de recursos, la existencia de un medio compartido por una cantidad arbitraria de nodos y el uso de frecuencias no licenciadas en las que operan varios sistemas de comunicaciones, aumentan la probabilidad de que la red experimente interferencias y limitan considerablemente la capacidad del sistema, debido a esto, se han desarrollado una variedad de protocolos para LLN con el fin de mejorar la disponibilidad y calidad de las redes LLN, entre ellos destaca por sus características el protocolo TSCH el cuál plantea una solución factible para los retos que implican las redes LLN, de ahí la importancia de analizarlo mediante simulaciones para ver sus ventajas y desventajas.

CAPÍTULO 2. SIMULACIÓN DE PS-TSCH CON ENLACES INESTABLES EN CONTIKI-NG

El presente capítulo se dedica a la descripción del entorno de simulación en el sistema operativo *Contiki-NG* usando el *ContikiOS Java Simulator* (COOJA, por sus siglas) sobre la plataforma de hardware genérica usada por el simulador del modo PS-TSCH con enlaces inestables. Se fundamenta la selección de estas tecnologías. A continuación, se describen los aspectos técnicos relacionados con la simulación de TSCH y 6TiSCH en *Contiki-NG*. Por último, se describen los escenarios de simulación empleados en esta investigación.

2.1 Selección de tecnologías

La selección de tecnologías a utilizar es una etapa fundamental en cualquier proceso investigativo. En el siguiente epígrafe se fundamenta la selección del sistema operativo *Contiki-NG* y del simulador COOJA para la simulación de TSCH.

2.1.1 Sistema operativo Contiki-NG y simulador COOJA

Contiki-NG [30] es un sistema operativo para dispositivos con recursos limitados en la IoT. Contiene una plataforma de comunicación IPv6 de bajo consumo que cumple con las normas RFC y permite la conectividad a Internet. El sistema funciona en una variedad de plataformas basadas en arquitecturas energéticamente eficientes como la ARM Cortex-M3/M4 y la Texas Instruments MSP430. La huella de código es del orden de 100 kB, y el uso de memoria puede configurarse para ser tan bajo como 10 kB. El código fuente está disponible como código abierto con una licencia BSD de 3 cláusulas.

Contiki-NG proporciona un entorno de desarrollo completo bajo Ubuntu Linux que está disponible en forma de máquina virtual. Este enfoque es fácil y de bajo riesgo, sin tener la

necesidad de alterar el sistema operativo actual que se esté utilizando. Este sistema operativo ha sido usado en una gran cantidad de investigaciones por parte de la comunidad científica, por ejemplo en: [31], [32], [33], etc. Esta y otras ventajas que se enumeraran a continuación son las que propician su elección para esta investigación, a pesar de que hay algunos otros sistemas operativos que se podrían utilizar tales como *TinyOS* [34] y *MANTIS* [35].

Los dispositivos de LLN *Contiki* suelen formar grandes redes inalámbricas. Desarrollar y depurar software para tales redes es realmente difícil. COOJA [36], el simulador de red de *Contiki*, facilita el proceso al proporcionar un entorno de simulación que permite a los desarrolladores ver sus aplicaciones ejecutándose en redes a gran escala y en detalle.

Ventajas de *Contiki-NG*

- *Contiki-NG* soporta completamente el estándar IPv6, junto con los recientes estándares inalámbricos de bajo consumo: 6lowPAN, RPL, CoAP.
- *Contiki-NG* facilita y agiliza el desarrollo de aplicaciones para LLN. Las aplicaciones *Contiki* están escritas en el lenguaje de programación C
- Es desarrollado por una comunidad mundial de desarrolladores con contribuciones de Atmel, Cisco, ETH, Redwire LLC, SAP, Thingsquare, y muchos otros, liderados por Simon Duquennoy.
- *Contiki-NG* proporciona un *shell* opcional de línea de comandos con un conjunto de comandos que son útiles durante el desarrollo y depuración de los sistemas *Contiki*. Las aplicaciones pueden definir sus propios comandos de *shell* que funcionan junto con los comandos existentes.
- Ofrece una gran cantidad de opciones de soporte.

Selección del simulador COOJA

Existe una gran diversidad actualmente en lo referente a simuladores de red para LLN que podrían utilizarse para llevar a cabo las tareas de simulación necesarias para esta investigación. Entre ellos desatacan algunos como: OPNET [37], TOSSim [38], Castalia/OMNeT++ [39], NS [40] y el COOJA, el cual fue elegido para utilizar en esta investigación debido a las razones planteadas a continuación. El simulador COOJA viene incluido como una herramienta de *Contiki-NG*. Permite simular *motes* que ejecutan

aplicaciones *Contiki-NG* y que se organizan en una red de sensores inalámbricos. COOJA brinda la posibilidad de emular cada *mote* a nivel de hardware para poder observar de manera más precisa su comportamiento, a la vez que facilita la comunicación con otros nodos que pertenecen a la misma red. COOJA tiene un menú sencillo e intuitivo que permite al usuario realizar una simulación, personalizarla, abrir una ya existente, etc. Gracias a los *plugins* que lleva incorporado, se puede interactuar con dicha simulación. Se caracteriza por su independencia con respecto al sistema operativo anfitrión sobre el que se aloja, su rapidez en la puesta en marcha del entorno, por eludir posibles incompatibilidades con compiladores, versiones de Java, entre otras cosas.

Simulación a través de niveles

COOJA soporta tres niveles de abstracción diferentes. Nodos simulados a nivel de aplicación o de red se implementan en Java. Sin ninguna conexión con *Contiki-NG*, los nodos en este nivel puede ser útil a la hora de crear prototipos de algoritmos de alto nivel que, cuando se prueban y evalúan, pueden portarse para ser desplegados como código del nodo sensor. Otros ejemplos de nodos Java útiles son registradores de paquetes de radio, y generadores de tráfico. Los nodos simulados a nivel de sistema operativo ejecutan código *Contiki-NG* desplegable, pero compilado como código nativo.

Todo un sistema *Contiki-NG*, incluyendo el núcleo, procesos de usuario preseleccionados, y un conjunto de controladores especiales de cola de simulación, está compilado para una biblioteca compartida. La biblioteca se carga y controla desde el simulador de Java a través de *Java Native Interfaces* (JNI, por sus siglas). COOJA explota el enfoque basado en eventos utilizado en *Contiki-NG* al llamar al sistema cargado de manera que cada nodo simulado maneje un evento por cada bucle de simulación. La memoria de la biblioteca define el estado de un nodo.

Cuando un nodo maneja un evento, las interfaces de los nodos simulados se comunican con el sistema *Contiki-NG* manipulando esta memoria de datos. COOJA soporta la carga de varias bibliotecas diferentes, las cuales se cargan desde diferentes objetos de tipo nodos. Como la memoria de códigos de la biblioteca es de sólo lectura, todos los nodos del mismo tipo comparten el mismo código de simulación. La memoria de datos de la biblioteca puede, sin embargo, diferir entre cada nodo simulado. El nivel de abstracción a nivel de código de máquina en COOJA se hace mediante la conexión de un emulador de microcontrolador

basado en Java al simulador. Los nodos emulados se controlan de forma similar a los nodos de código nativo. Cada nodo simulado está autorizado a ejecutarse durante un período de tiempo determinado, como máximo, o el tiempo suficiente para manejar un evento. Los eventos son entonces, mediante el uso de la función memoria del nodo en uso, transferidos a través de las interfaces de hardware hacia y desde el simulador.

Modelos de radio presentes en COOJA

COOJA soporta una serie de modelos de radio que caracterizan la propagación de los datos y proporciona a los usuarios la capacidad de probar las aplicaciones desarrolladas por ellos en variadas condiciones representadas por dichos modelos de radio. Se puede seleccionar el modelo a utilizar al comienzo de la simulación.

Actualmente existen cuatro tipos en COOJA:

- *Unit Disk Graph Radio Medium (UDGM)*: Se considera que hay una pérdida de distancia constante: ambos rangos de radio, tanto de transmisión como de recepción, crecen con el indicador de potencia de salida de radio. El rango máximo de transmisión se multiplicará por la fracción de potencia de salida respecto a la máxima potencia de salida que pueda tener el dispositivo simulado y el resultado de la potencia de transmisión se compara con la distancia en el escenario de simulación. Esto significa que, si el rango máximo de transmisión de un dispositivo es de 100 m y la potencia actual de salida es la mitad del máximo posible, la circunferencia dentro de la cual los paquetes se recibirán correctamente tendrá un radio de 50 m. Para las transmisiones de radio dentro del rango, se utilizan dos relaciones de éxito diferentes [0.0-1.0]: una para transmisiones exitosas y otra para recepciones exitosas. Si la transmisión falla, ninguna radio escuchará la transmisión. Si una de las recepciones falla, sólo la radio receptora no recibirá la transmisión, sino que será interferida a través de toda la conexión de radio. Para UDGM con pérdida de distancia, la intensidad de la señal de paquete de radio recibida crece inversamente con la distancia al transmisor. Los ratios de transmisión y recepción son sólo variables aleatorias que se añaden al envío o recepción de un paquete para permitir la simulación de errores aleatorios en TX o RX respectivamente. El UDGM representa el rango de transmisión de radio como círculos. Utiliza dos parámetros de alcance diferentes, uno para las transmisiones y otro para interferir con otras radios y transmisiones. El rango de

transmisión es el rango en el que el paquete transmitido puede ser recibido correctamente por cualquier nodo dentro de este rango. mientras que el rango de interferencia es el rango en el que la transmisión puede ser escuchada pero el paquete transmitido no puede ser recibido correctamente. fuera de estos dos rangos, el paquete no puede ser escuchado. Se detectará una colisión si un nodo intenta transmitir mientras se encuentra en el rango de TX de un nodo que está enviando al mismo tiempo. Si está utilizando CSMA, el paquete se retransmitirá después de un tiempo de espera aleatorio, de lo contrario, el paquete será eliminado.

- *Multi-path Ray-tracing radio medium (MRM)*: MRM es una alternativa a los medios de radio más simples disponibles en COOJA. Se basa en paquetes y utiliza un enfoque de trazado de rayos 2D para aproximar la atenuación de la intensidad de la señal entre radios simuladas. Actualmente el trazado de rayos sólo soporta reflexiones y refracciones a través de obstáculos homogéneos. MRM utiliza una potencia de transmisión configurable pero común para todas las radios. MRM proporciona dos *plugins*: uno para visualizar el entorno de radio, y otro para configurar los parámetros del medio radioeléctrico. MRM soporta tanto radios con fuente de ruido como radios con antena direccional.
- *Directed Graph Radio Medium (DGRM)*: Es posible utilizarlo como base de otras implementaciones de modelos de radio. Establece una tasa de éxito de transmisión y un retraso para cada enlace entre dos nodos.

En esta investigación se utiliza el modelo de radio UDGM, ya que introduce las pérdidas necesarias para realizar las simulaciones y además tiene la ventaja de ser relativamente simple y a la vez efectivo.

2.1 Escenario de simulación.

En la presente investigación se evalúa la energía consumida y el tiempo de formación de una red lineal de 1 a 6 nodos (red de hasta 6 saltos) más un coordinador, variando la confiabilidad del enlace de 60% a 100% utilizando 8 canales para la transmisión de EBs.

Iniciando la simulación solo el coordinador es parte de la red TSCH y los otros nodos van a estar intentando asociarse a dicha red. La simulación se realiza utilizando COOJA, incluido en la distribución de *Contiki-NG*. Para reducir la carga computacional se emplea la

simulación automática prescindiendo de la interfaz gráfica, la cual tiene la ventaja de ser bastante intuitiva pero no aporta datos relevantes. Se realizan 250 iteraciones para cada simulación utilizando semillas aleatorias diferentes con el objetivo de proporcionar determinado nivel de validez estadística a los resultados.

2.1.1 Configuración de la red

El despliegue de la red se realiza teniendo en cuenta que la topología física de la red sea una red lineal. Además, se configuran un área de interferencia con un radio del doble del área de transmisión, con el objetivo de emular el comportamiento de la interferencia entre dispositivos cercanos, incluyendo efecto como el del terminal escondido, etc. El radio del área de transmisión se configura a 20m y, por consiguiente, el radio del área de interferencia es de 40m.

Para esta investigación se utiliza la implementación de TSCH disponible en *Contiki-NG* y presentada en [41]. La configuración del protocolo TSCH se realiza de manera que se emplee la programación de la configuración mínima de 6TiSCH, la cual está compuesta por una única trama de ranuras, de 11 ranuras de longitud, con una sola ranura activa al inicio de la trama de ranuras. Esta ranura activa es compartida y común para todos los nodos de la red, y en ella se cursa todo el tráfico de la red. La duración de cada ranura es de 10ms, lo cual es suficiente para la transmisión de una trama de tamaño máximo y el ACK correspondiente, teniendo en cuenta que se utiliza un radio de 250kbps de velocidad de transmisión de datos.

Para el proceso de asociación, el tiempo entre EBs sigue una distribución uniforme con valor máximo 3.0s y un valor mínimo de 2.25s. Cada EB se envía en la ranura activa disponible siguiente a la expiración del tiempo entre EBs calculado. El tiempo que cada nodo que está intentando asociarse a la red permanece escaneando cada canal durante 1s.

2.1.2 Tiempo de formación de la red lineal.

Para realizar esta simulación se modifica el código fuente de la implementación de TSCH en *Contiki-NG* con el objetivo de permitir que los nodos impriman un mensaje al momento de asociarse a la red TSCH. De esta forma se puede registrar con exactitud el momento en que cada nodo pasa a formar parte de dicha red. El tiempo que demore en imprimir el mensaje el nodo más alejado del coordinador es el tiempo que demora en formarse completamente la red TSCH. Recordemos que se utiliza una topología de red lineal, por tanto los nodos se van a unir a la red de forma secuencial.

2.1.3 Consumo de energía en el proceso de formación de la red lineal TSCH.

Como se planteó en capítulos anteriores, durante el proceso de asociación, los nodos mantienen la radio encendida todo el tiempo a la espera de EBs que les permitan asociarse a la red TSCH. Una vez que los nodos se han asociado a la red, comienzan a realizar RDC y sólo encienden la radio durante las ranuras activas de su programación TSCH. El consumo de energía de los nodos LLN basados en IEEE 802.15.4, es casi el mismo cuando la radio está transmitiendo, recibiendo un paquete o escuchando el medio. Es importante señalar que cuando la radio está escuchando el medio entra en modo de recepción, y el consumo de energía es el mismo que cuando recibe un paquete. Además, una vez que un nodo se asocia a la red, éste comienza a realizar RDC, y su consumo de energía disminuye.

En los escenarios se plantea una red configurada en una topología lineal compuesta por un coordinador y 6 nodos que intentan asociarse a la misma, con una confiabilidad del enlace de 60%. El consumo de energía se estima de la siguiente manera. Se mide el tiempo necesario para que cada nodo se asocie a la red, denominado como ta_k y el tf de la red de 6 saltos. Luego, se necesita conocer el tiempo que cada nodo permanece realizando RDC antes de la formación de la red denominado como tr_k , el cual se calcula con la ecuación: $tr_k = tf - ta_k$.

Por lo tanto, el consumo total de energía del nodo k durante la formación de la red, denominado Ef_k , está dado por:

$$Ef_k = ta_k Pa + tr_k Pr \quad (2.1)$$

Donde $Passoc$ es la potencia consumida por el nodo cuando tiene la radio encendida durante la asociación y Pr es la potencia consumida por el nodo cuando está realizando RDC. La potencia consumida por los nodos en cada estado se estima multiplicando la tensión proporcionada por la fuente de alimentación (más comúnmente, baterías) multiplicada por la corriente consumida en cada modo.

Para calcular el consumo de energía de los nodos al realizar RDC, se mide el tiempo en que cada nodo tiene la interfaz de radio en los modos TX y RX (denominados tTx y tRx , respectivamente). El ratio de estos tiempos sobre el tiempo total que cada nodo pasa realizando RDC antes de la formación de la red, denotado como Rtx y Rrx , respectivamente, puede calcularse de la siguiente manera:

$$R_{tx} = \frac{t_{Tx}}{tr_k} \quad y \quad R_{rx} = \frac{t_{Rx}}{tr_k}$$

Luego, el consumo de energía de cada nodo entre su asociación y la formación de la red se calcula como:

$$Pr = R_{tx} P_{tx} + R_{rx} P_{rx} + [1 - (R_{tx} + R_{rx})] \cdot P_i \quad (2.2)$$

Donde P_{tx} , P_{rx} y P_i son la energía consumida por el nodo cuando la interfaz de radio está en los modos TX, RX e inactiva, respectivamente.

2.3 Conclusiones parciales del capítulo.

La selección del sistema operativo *Contiki-NG* para realizar la presente investigación se fundamenta debido a que tiene la capacidad de soportar completamente el estándar IPv6, y los estándares inalámbricos de bajo consumo: 6lowPAN, RPL, CoAP. Este sistema operativo proporciona un Shell opcional de líneas de comando útiles durante el desarrollo y depuración de los sistemas LLN de *Contiki-NG*. Como ventaja añadida el mismo ofrece una gran cantidad de opciones de soporte, y tiene un equipo sólido de desarrolladores

En lo referente a la selección del simulador COOJA, este viene integrado en el sistema operativo *Contiki-NG* y se complementan el uno al otro. Presentando una relativa facilidad para llevar a cabo simulaciones de redes LLN con diferentes características. COOJA brinda la posibilidad de emular cada mote a nivel hardware para poder observar de manera más precisa su comportamiento a la vez que facilita la comunicación con otros nodos que pertenecen a la misma red. COOJA tiene un menú sencillo e intuitivo que permite al usuario realizar una simulación, personalizarla, abrir una ya existente, etc.

CAPÍTULO 3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos en las tareas de simulación descritas en el capítulo anterior. La discusión se centra en el desempeño del protocolo TSCH utilizando el modo de escaneo pasivo PS-TSCH para enlaces con cierto grado de inestabilidad, centrándose específicamente en el tiempo y la energía consumidos en la formación de la red de topología lineal.

3.1 Tiempo consumido en la formación de la red

La simulación permite determinar el tiempo que consume cada nodo en asociarse a la red, siendo el momento en que el último nodo se asocia el tiempo total que tardó en formarse la red TSCH para los valores de inestabilidad de enlace comprendidos entre 60% y 100% de estabilidad.

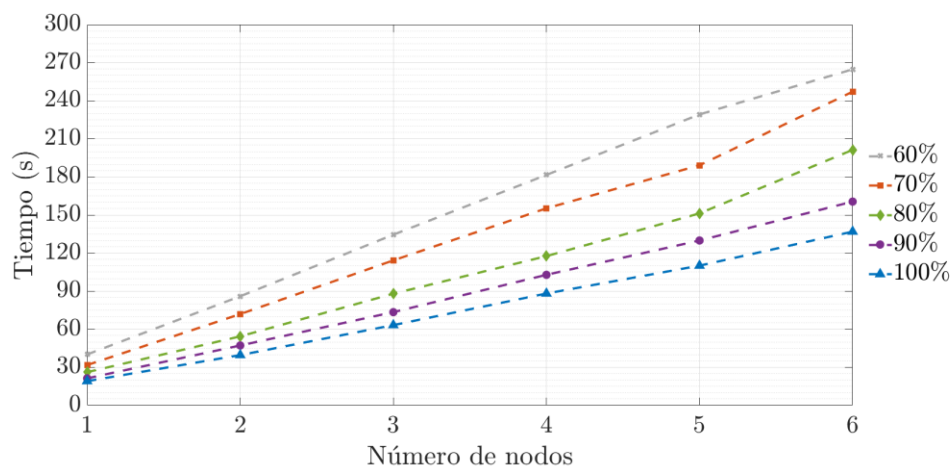


Figura 3.1 Valores de tiempo que demora cada nodo en asociarse a la red TSCH

En la Figura 3.1 se puede apreciar que para la topología propuesta el tiempo que demora la formación de la red para valores de confiabilidad del 100%, del 90%, del 80%, del 70% y del 60%, en función del diámetro de la red (eje de abscisas). Como predice el modelo teórico descrito por la ecuación (1.3), al disminuir el grado de estabilidad de los enlaces, el tiempo de formación de la red aumenta proporcionalmente. Para un 100% de confiabilidad el último nodo demora 136s en asociarse, y para un 60% demora 265s, aumentando en 129s el tiempo de formación de la red. Esto representa un incremento del tiempo de formación de la red del 51%.

3.2 Comparación entre las simulaciones y el modelo teórico para el tiempo de formación de la red

En esta sección, como se muestra en la figura 3.2, se procede a comparar los valores obtenidos de forma experimental mediante el proceso de simulación con los valores obtenidos a través del modelo teórico presentado anteriormente en la sección 1.2.5. Se puede apreciar cuanto se aleja dicho modelo de una red más realista para el tiempo que demora la red en establecerse. Para este análisis sólo se utilizaron los valores de confiabilidad de 100%, 80% y 60% con el fin de facilitar la lectura e interpretación de la gráfica mostrada en la Figura 3.2, ya que de utilizarlos todos ocurriría superposición entre las gráficas, lo cual hace muy confusa la representación y dificulta el análisis del gráfico.

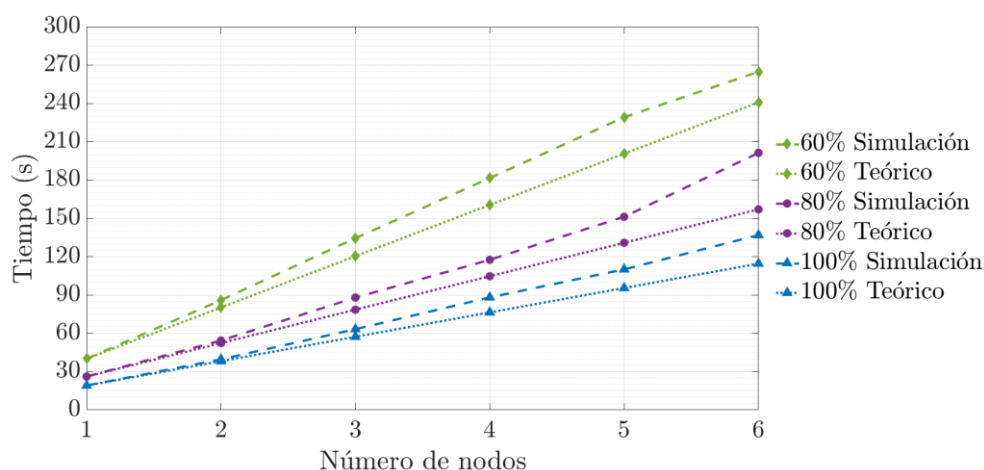


Figura 3.2 Comparación entre los valores obtenidos mediante la simulación y los valores predichos por el modelo teórico para el tiempo de formación de la red.

Como se puede apreciar, los valores experimentales no son exactamente iguales a los obtenidos a través del modelo, aunque siguen la misma tendencia. Esto se debe a que el modelo teórico solo tiene en cuenta como tráfico el envío de EBs, mientras que en redes más realistas, como las utilizadas en la simulación, también es necesario cursar otros tipos de tráfico además de los EBs, como por ejemplo el tráfico de control del protocolo de ruteo RPL, el tráfico de datos de aplicación, etc. Esto trae como consecuencia que exista diferencia entre el modelo teórico y los resultados de simulación. No obstante, introducir dichos flujos de tráfico dentro del modelo implica incrementar la complejidad del mismo, lo que, como muestra la Figura 3.2, no es necesario para obtener un estimado del tiempo de formación de la red. La obtención de resultados experimentales que siguen la misma tendencia que el modelo teórico, valida dicho modelo. Esto permite la utilización de dicho modelo para futuras investigaciones en este campo.

3.3 Energía consumida en el proceso de formación de la red.

Esta sección tiene como objetivo analizar, la energía consumida por cada nodo en el proceso de formación de la red. Teniendo en cuenta que, como ya se explica en la sección 2.2.2, durante el tiempo en el que el nodo no está asociado a la red mantiene la radio encendida escaneando los diferentes canales en busca de un EB que le permita asociarse a la red, y el tiempo luego de la asociación durante el cual se mantiene haciendo RDC. Cabe destacar que mientras el nodo se encuentra escaneando, el consumo de energía es considerablemente mayor que cuando se encuentra haciendo RDC.

Por lo cual el nodo con mayor consumo de energía es el último en asociarse ya que como se está analizado una red lineal en la cual los nodos solo pueden asociarse mediante el nodo inmediatamente anterior a él en la red, el nodo número 6 se pasa más tiempo escaneando que los demás y menos tiempo haciendo RDC.

La Figura 3.3 muestra la energía consumida por cada uno de los nodos de una red lineal de 1 a 6 nodos durante la formación de la red. Es importante recordar que aquí se tiene en cuenta no solamente la energía consumida por cada nodo durante su asociación individual sino, además, la energía consumida por cada nodo después de su asociación hasta la formación completa de la red.

Como se puede apreciar al analizar el gráfico, a mayor distancia del coordinador, mayor consumo de energía por parte de los nodos, pues pasan más tiempo escaneando la red que haciendo RDC durante la formación de la misma. Además a medida que disminuye la confiabilidad de la red aumenta la energía consumida en su formación. Por ejemplo, para una confiabilidad de los enlaces del 100% el valor máximo de consumo de energía es de 7.5mJ por el nodo 6. Y al 60% se consumen 14.5mJ. Nótese que, al ser proporcional el consumo de energía y el tiempo de formación de la red, la diferencia entre 100% de confiabilidad y 60% de confiabilidad en cuanto a consumo de energía es la misma en términos porcentuales, o sea un 51%.

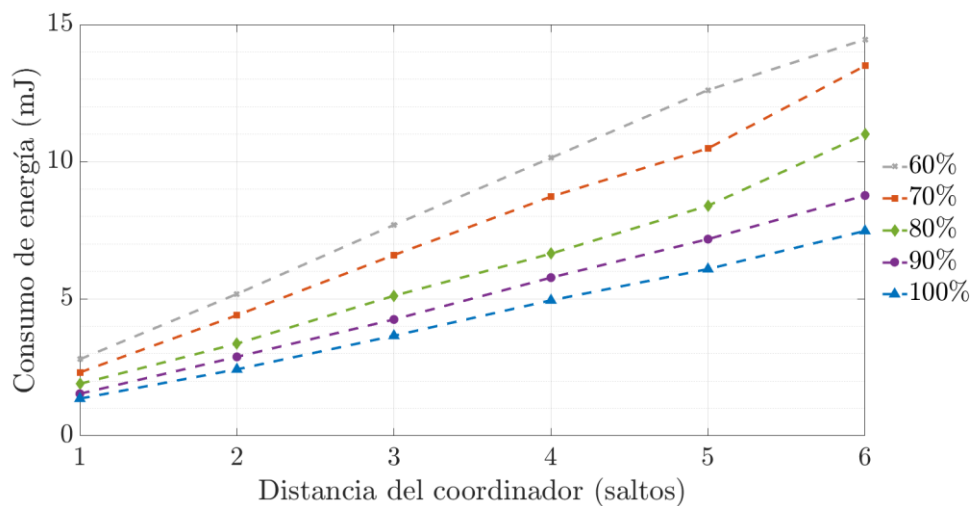


Figura 3.3 Energía consumida por los nodos en el proceso de formación de la red.

Para evidenciar esto, en la figura 3.4, se desglosa en una gráfica de barras el consumo individual de cada nodo mientras ocurre el proceso de asociación y luego de esta, cuando el nodo se encuentra haciendo RDC. Nótese que los nodos más cercanos al coordinador, al asociarse en menos tiempo, consumen menos energía en su asociación individual pero permanecen consumiendo energía mientras hacen RDC en espera de la formación de la red completa.

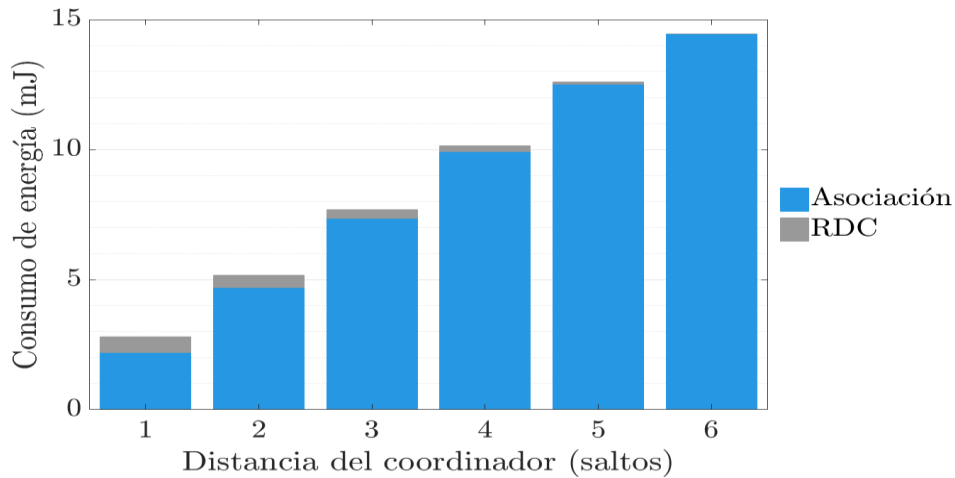


Figura 3. 4 Energía consumida mientras los nodos están intentando asociarse y cuando están realizando RDC.

Se puede apreciar que el aumento de estos valores de energía coincide con el tiempo de formación de la red, por lo cual se hace necesario implementar un nuevo modo de escaneo que reduzca el tiempo de formación de la red, para de esta forma aumentar el tiempo de vida de estos dispositivos.

3.4 Conclusiones parciales del capítulo.

Los valores obtenidos al utilizar el modelo teórico explicado anteriormente para calcular el tiempo de formación de la red demuestran que éste permite estimar el tiempo de formación de la red TSCH. Sin embargo, este modelo no incluye otro tipo de tráfico además de los EBs, lo cual no es aplicable a redes reales las cuales manejan una cantidad mayor de tráfico, el cual ralentiza el proceso de formación de la red, aunque ambos, el modelo teórico y el experimental siguen la misma tendencia.

Como se ha demostrado a través de los datos obtenidos de la simulación, la energía consumida por los nodos durante el proceso de formación de la red es directamente proporcional al tiempo que esta demora en formarse, el cual aumenta de forma significativa al disminuir el nivel de confiabilidad de los enlaces. Por esta razón, con el fin de aumentar la vida útil de la red y agilizar la disponibilidad de los datos recopilados por esta desde su despliegue, es necesario investigar modos de funcionamiento que agilicen el proceso completo de formación de la red.

CONCLUSIONES

A partir del desarrollo de esta investigación se puede concluir que:

- Los protocolos de comunicación MAC multicanal en las LLNs hacen posible la transmisión de datos en paralelo a partir del uso de múltiples canales y las técnicas de diversidad de frecuencia permiten aumentar la razón de transferencia exitosa de la red y disminuir los efectos de interferencia y *jamming*.
- El protocolo TSCH, a pesar de sus limitaciones plantea una solución factible para los retos que implican las redes LLN, de ahí la importancia de analizarlo mediante simulaciones para ver sus ventajas y desventajas. Partiendo de la necesidad de disminuir todo lo posible el consumo energético de los nodos, los cuales generalmente son alimentados mediante baterías, aumentando su vida útil.
- Para lograr los diferentes objetivos de esta investigación, se han ejecutado simulaciones de la formación de una red TSCH de 1 a 6 nodos con topología lineal en con diferentes valores de confiabilidad de los enlaces utilizando para ello el sistema operativo *Contiki-NG* y su simulador integrado COOJA. Dando al proceso de simulación una relativa facilidad para llevar a cabo los experimentos realizados.
- COOJA brinda la posibilidad de emular cada mote a nivel hardware para poder observar de manera más precisa su comportamiento a la vez que facilita la comunicación con otros nodos que pertenecen a la misma red.

Los resultados de la simulación demuestran que:

- El tiempo de formación de la red aumenta de forma significativa al disminuir el nivel de confiabilidad de los enlaces.
- Los valores obtenidos al utilizar el modelo teórico utilizado para calcular el tiempo de formación de la red permiten estimar el tiempo de formación de la red TSCH.
- Dicho modelo solo incluye tráfico de tipo EB, lo cual no es aplicable a redes reales las cuales manejan una mayor diversidad de tráfico, el cual ralentiza el proceso de formación de la red. No obstante, el modelo teórico y el experimental siguen la misma tendencia.

- La energía consumida por los nodos durante el proceso de formación de la red es directamente proporcional al tiempo que esta demora en formarse.

RECOMENDACIONES

Los autores de esta investigación proponen las siguientes recomendaciones para investigaciones futuras centradas en mejorar el desempeño del protocolo MAC multicanal TSCH para LLN:

- Hacer una implementación real de PS-TSCH con el objetivo de corregir errores propios de los valores aportados por las simulaciones y ver cómo se comporta en entornos reales.
- Analizar y simular el modo de operación PRV-TSCH recientemente desarrollado.
- Comparar modo de escaneo PS-TSCH con PRV-TSCH para enlaces inestables. Con el objetivo de apreciar realmente en cuanto mejora el tiempo de formación de la red con este nuevo procedimiento. Y si es factible aplicarlo realmente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Gubbi, J., et al., *Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions*. Future generation computer systems, 2013. **29**(1): p. 1645-1660.
2. Said, O. and M. Masud, *Towards internet of things: Survey and future vision*. International Journal of Computer Networks, 2013. **5**(1): p. 1-17.
3. Shelby, Z. and C. Bormann, *6LoWPAN: The wireless embedded Internet*. Vol. 43. 2011: John Wiley & Sons.
4. Kortuem, G., et al., *Smart objects as building blocks for the internet of things*. IEEE Internet Computing, 2009. **14**(1): p. 44-51.
5. Zhu, Q., et al. *Iot gateway: Bridging wireless sensor networks into internet of things*. in *2010 IEEE/IFIP International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing*. 2010. Ieee.
6. EkbataniFard, G. and R. Monsefi, *A Detailed Review of Multi-Channel Medium Access Control Protocols for Wireless Sensor Networks*. International Journal of Wireless Information Networks, 2011. **19**: p. 1–21.
7. García Algora, C.M., et al., *Parallel Rendezvous-Based Association for IEEE 802.15.4 TSCH Networks*. IEEE Sensors Journal, 2018. **18**: p. 9005–9020.
8. Incel, O.D., *A survey on multi-channel communication in wireless sensor networks*. Computer Networks, 2011. **55**: p. 3081–3099.
9. Soua, R. and P. Minet, *Multichannel assignment protocols in wireless sensor networks: A comprehensive survey*. Pervasive and Mobile Computing, 2015. **16**: p. 2–21.
10. García Algora, C.M., et al., *Review and Classification of Multichannel MAC Protocols for Low-Power and Lossy Networks*. IEEE Access, 2017. **5**: p. 19536–19561.
11. Society, I.C., *IEEE Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. Vol. 2015. 2015.

12. Montenegro, G., et al., *Transmission of IPv6 packets over IEEE 802.15. 4 networks*. 2007.
13. Gaddour, O., et al. *Simulation and performance evaluation of DAG construction with RPL*. in *Third international conference on communications and networking*. 2012. IEEE.
14. Dawson, M., M. Eltayeb, and M. Omar, *Security solutions for hyperconnectivity and the Internet of things*. 2016: IGI Global.
15. Winter, T., et al., *RPL: IPv6 routing protocol for low-power and lossy networks*. 2012.
16. Villaverde, B.C., et al. *Constrained application protocol for low power embedded networks: A survey*. in *2012 Sixth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing*. 2012. IEEE.
17. Mulligan, G. *The 6LoWPAN architecture*. in *Proceedings of the 4th workshop on Embedded networked sensors*. 2007. ACM.
18. Palattella, M.R., et al., *6tisch wireless industrial networks: Determinism meets ipv6*, in *Internet of Things*. 2014, Springer. p. 111-141.
19. Patti, G., G. Alderisi, and L.L. Bello. *Introducing multi-level communication in the IEEE 802.15. 4e protocol: the MultiChannel-LLDN*. in *Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*. 2014. IEEE.
20. Watteyne, T., M. Palattella, and L. Grieco, *Using IEEE 802.15. 4e time-slotted channel hopping (TSCH) in the internet of things (IoT): Problem statement*. 2015.
21. Finkenzeller, K., *RFID handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication*. 2010: John Wiley & Sons.
22. Schaefer, F.-M. and R. Kays. *A wireless multi-Channel transmission system for smart home applications*. in *European Wireless 2014; 20th European Wireless Conference*. 2014. VDE.
23. Algora, C.M.G., et al., *Parallel Rendezvous-Based Association for IEEE 802.15. 4 TSCH Networks*. *IEEE Sensors Journal*, 2018. **18**(21): p. 9005-9020.

24. Vilajosana, X., K. Pister, and T. Watteyne, *RFC 8180: Minimal IPv6 over the TSCH Mode of IEEE 802.15. 4e (6TiSCH) Configuration*. Internet Engineering Task Force (IETF) Informational Document; Internet Engineering Task Force: Fremont, CA, USA, 2017.
25. Vogli, E., et al. *Fast join and synchronization schema in the IEEE 802.15. 4e MAC*. in *2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*. 2015. IEEE.
26. Vogli, E., et al., *Fast network joining algorithms in industrial IEEE 802.15. 4 deployments*. *Ad Hoc Networks*, 2018. **69**: p. 65-75.
27. Duy, T.P., T. Dinh, and Y. Kim, *A rapid joining scheme based on fuzzy logic for highly dynamic IEEE 802.15. 4e time-slotted channel hopping networks*. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2016. **12**(8): p. 1550147716659424.
28. Duy, T.P. and Y. Kim. *An efficient joining scheme in IEEE 802.15. 4e*. in *2015 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*. 2015. IEEE.
29. De Guglielmo, D., et al. *A performance analysis of the network formation process in IEEE 802.15. 4e TSCH wireless sensor/actuator networks*. in *2014 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*. 2014. IEEE.
30. Kurniawan, A., *Practical Contiki-NG: Programming for Wireless Sensor Networks*. 2018: Apress.
31. Tomasic, I., et al. *Enabling IoT based monitoring of patients' environmental parameters: Experiences from using OpenMote with OpenWSN and Contiki-NG*. in *2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*. 2018. IEEE.
32. Elsts, A., E. Mitskas, and G. Oikonomou. *Distributed ledger technology and the internet of things: A feasibility study*. in *Proceedings of the 1st Workshop on Blockchain-enabled Networked Sensor Systems*. 2018. ACM.
33. Gonzalo Peces, C., *Energy-Efficient Communication with Lightweight M2M in IoT Networks*. 2018.

34. Levis, P., et al., *TinyOS: An operating system for sensor networks*, in *Ambient intelligence*. 2005, Springer. p. 115-148.
35. Bhatti, S., et al., *MANTIS OS: An embedded multithreaded operating system for wireless micro sensor platforms*. *Mobile Networks and Applications*, 2005. **10**(4): p. 563-579.
36. Sehgal, A., *Using the contiki cooja simulator*. Computer Science, Jacobs University Bremen Campus Ring, 2013. **1**: p. 28759.
37. Chang, X. *Network simulations with OPNET*. in *WSC'99. 1999 Winter Simulation Conference Proceedings.'Simulation-A Bridge to the Future'*(Cat. No. 99CH37038). 1999. IEEE.
38. Levis, P. and N. Lee, *Tossim: A simulator for tinyos networks*. UC Berkeley, September, 2003. **24**.
39. Varga, A., *OMNeT++*, in *Modeling and tools for network simulation*. 2010, Springer. p. 35-59.
40. Altman, E. and T. Jimenez, *NS Simulator for beginners*. *Synthesis Lectures on Communication Networks*, 2012. **5**(1): p. 1-184.
41. Duquennoy, S., et al. *TSCH and 6TiSCH for Contiki: Challenges, Design and Evaluation*. in *in Proceedings of the International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (IEEE DCOSS 2017)*. 2017.