

Revisión de requisitos, protocolos y desafíos en LWSN

Survey of requirements, protocols, and challenges in LWSN

C. Egas Acosta, F. Gil-Castiñeira

Abstract—Wireless sensor networks apply to different topologies. A particular case is a linear topology included in monitoring large-scale linear infrastructures. Linear topology requirements differ from other topologies. The architectures and protocols for wireless sensor networks are references modified depending on the application. These architectures and protocols are complex if applied to linear topologies with thousands of nodes. This paper discusses the existing standards and protocols applicable to linear wireless sensor networks, defines their particular characteristics, and how current protocols can satisfy the requirements of networks with linear topology. The information related to linear Wireless sensor networks, medium access control, routing, transport, and the specific needs of this type of network is presented. Finally, the challenges for the existing protocols and some challenges to the new protocol's design of linear topology are identified.

Index Terms— WSN, Linear topology, routing, link, transport

Resumen—Las redes inalámbricas de sensores son aplicables en diferentes topologías, un caso especial es la topología lineal, la cual está presente en el monitoreo de infraestructuras lineales a gran escala. Los requisitos de las topologías lineales difieren de las otras topologías. Las arquitecturas y protocolos para las redes inalámbricas de sensores son referencias que se modifican en función de la aplicación, estas arquitecturas y protocolos son muy complejos si se les aplica a topologías lineales con miles de nodos. En este artículo se discute los estándares y protocolos existentes aplicables a las redes inalámbricas de sensores lineales, se definen sus características muy particulares y como los protocolos existentes pueden satisfacer los requisitos de redes con topología lineal. Luego se presenta información relacionada con las redes inalámbricas de sensores lineales, el control de acceso al medio, el enrutamiento, el transporte y los requerimientos específicos de este tipo de redes. Finalmente, se identifica los desafíos para los protocolos existentes y algunos desafíos para los nuevos protocolos diseñados para topologías lineales.

Palabras Claves— WSN, Topologías lineales, enrutamiento, enlace, transporte

I. INTRODUCCIÓN

LA red inalámbrica de sensores (Industrial Wireless Sensor Network - WSN) es una red de nodos desplegados para

obtener información resultado del monitoreo de eventos para una aplicación dada. Los nodos sensores se caracterizan por su limitada capacidad de cómputo y su operación con baterías [1]. Inicialmente estos dispositivos se utilizaron en aplicaciones militares [2], con el desarrollo de tecnologías inalámbricas, sensores y baterías, su aplicabilidad ha aumentado considerablemente. Las redes inalámbricas de sensores industriales (Industrial Wireless Sensor Network - IWSN) [3], redes inalámbricas sensoras y actuadoras (Wireless Sensor and Actuator Network - WSAN) [4] son el resultado de este desarrollo, con aplicaciones en entornos inteligentes con automatización de sistemas de control [5], aplicaciones en el área de hogares inteligentes [6], cuidado de la salud [7], y ciudades inteligentes [8].

Este artículo se centra en el uso de WSN en infraestructuras lineales a gran escala, también conocidas como redes inalámbricas de sensores con topología lineal (LWSN) [9] y considera específicamente aplicaciones de sistemas de seguridad y monitoreo que se caracterizan por bajo tráfico y con implementaciones en lugares donde a lo largo de la infraestructura lineal, las interferencias son mínimas como es el caso de fronteras, oleoductos etc.

La industria apoya económicamente actividades de investigación para mejorar la tecnología de WSN en topologías lineales a gran escala. Esto se debe a que el objetivo de la implementación es utilizar nodos de bajo consumo y bajo costo porque reducen significativamente el gasto de inversión (CAPEX) y gastos operativos (OPEX) de la red, en comparación con las redes cableadas [10], sin pérdida de calidad de servicio (QoS) ya que no se requiere infraestructura física para la transmisión de los datos y para proporcionar energía a los nodos.

En la Fig. 1 se presenta un escenario general de una LWSN en el cual un nodo dentro de la infraestructura lineal sensa un evento, y envía la información al Colector de Datos, usa para ello los nodos frontera. Es una red multisalto en donde la zona de cobertura depende del estándar IEEE 802.15.4 que dio origen a este tipo de redes [11]. El alcance de un nodo es de 70 metros. En cada zona de cobertura existen pocos nodos y para tener una infraestructura lineal con decenas de kilómetros se requiere tener miles de nodos retransmisores. El análisis de las características de la topología lineal obliga a analizar detenidamente las funciones de control de acceso medio (MAC), enrutamiento y transporte.

Egas Acosta is with the Departamento en Electrónica y Telecomunicaciones, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador (e-mail: carlos.egas@epn.edu.ec).

Felipe Gil-Castiñeira is with the Universidad de Vigo, Vigo, España (e-mail: xil@gti.uvigo.es).

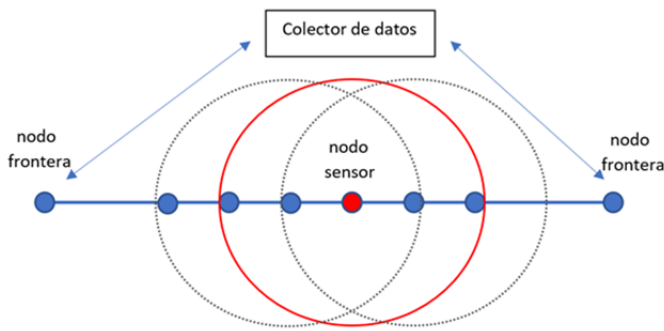


Fig. 1. Red inalámbrica de sensores con topología lineal.

Existe un debate sobre si en las WSN se debe replicar la estructura en capas de Internet o si debería tener un diseño más flexible [12]. Este debate toma importancia debido a que en una topología lineal hay una sola ruta física, el número de nodos dentro de la zona de cobertura de un nodo sensor es mínimo y el número de aplicaciones a ejecutarse en el nodo es limitado. En [13] se discute si el enrutamiento en una WSN se debe implementar en la capa de red o en la capa de enlace. En este artículo se sustenta que, con una topología lineal, al existir una sola ruta física, los procesos de enrutamiento son mínimos y las funciones que deben implementarse para minimizar los efectos de nodos dañados y enlaces ruidosos, podrían formar parte de otras capas.

El nodo de una LWSN consta de tres componentes principales: el sistema de procesamiento, el sistema transreceptor y el sistema sensor. El sistema transreceptor consume la mayor cantidad de energía que la consumida por el sistema de procesamiento en el nodo [14]. La capa de control de acceso al medio (MAC) es la responsable del acceso medio que controla la mayor parte de la comunicación por radio, por lo tanto, esta capa juega un papel vital en la eficiencia energética y la disminución de la latencia en el nodo, la función de enrutamiento puede afectar considerablemente al consumo de energía debido a que el algoritmo de enrutamiento es demasiado complejo en relación con la topología lineal de la red. El protocolo de transporte en una WSN es el responsable del control de congestión y la recuperación de pérdidas, con fiabilidad.

Un tema importante en las LWSN, tiene relación con el retardo en la transmisión de extremo a extremo que se genera por ser una red multisalto con cientos de nodos retransmisores y con el consumo de energía de los nodos que deben retransmitir los mensajes en especial de los nodos cercanos a los nodos frontera [15].

Las contribuciones de este artículo relacionadas con las LWSN son las siguientes:

- Promover la utilización de WSN en topologías lineales multisalto con miles de nodos, en base a los requerimientos particulares de este tipo de redes.
- Concentrar nuestro análisis para la inclusión de las funciones de enrutamiento en el nivel de enlace.
- Presentar protocolos representativos para MAC, enrutamiento y transporte.
- Presentar los desafíos que se presentan en la

implementación de este tipo de redes.

II. LWSN, APLICACIONES, REQUISITOS Y ESTÁNDARES

En [16], se presenta criterios para realizar una clasificación de las LWSN, en base a la manera como se realiza la comunicación a la estación de control, y en función de la topología que forman las estructuras lineales a gran escala que pueden interconectarse entre sí.

A. Aplicaciones

La utilización de las LWSN en una amplia gama de aplicaciones de monitoreo se debe a que se elimina el requisito de presencia humana a lo largo de grandes infraestructuras lineales. El costo es menor en comparación con las soluciones de cable, ya que la implementación del cableado implica un costo superior tanto para transmitir los datos como para su alimentación de energía. Las aplicaciones más comunes, pueden pertenecer a estas dos categorías: sistemas de seguridad y sistemas de monitoreo, aplicaciones que se explican a continuación.

Los sistemas de seguridad están asociados con la seguridad en accesos en fronteras [17], la detección de roturas en oleoductos [18], y son algunas de las aplicaciones en las cuales la LWSN garantiza su aplicabilidad al proporcionar varias características como monitoreo en tiempo real servicio habilitado en la web para proporcionar información al personal que controla los accesos.

Los sistemas de monitoreo son los sistemas de recopilación de información que han sido utilizados por LWSN de manera tradicional con requisitos mínimos. Estos sistemas sirven a una amplia gama de aplicaciones [19] [20], incluyen monitoreo ambiental de minas [21], carreteras, ferrocarriles [22] oleoductos [23], fronteras [17] y monitoreo de túneles [24]. Estos sistemas se utilizan básicamente para recopilar datos sobre un área determinada durante un período prolongado.

B. Requisitos de las LWSN

A continuación, se presenta y analiza los requisitos de las LWSN a gran escala.

En una LWSN, los costos de implementación y operación de la red deben ser mínimos y permitir aumentar las ganancias de los operadores de la red. Los requisitos de menor costo para la implementación y operación son las principales motivaciones que impulsan la transición del uso de soluciones cableadas a soluciones inalámbricas [10]. Además de reducir los requisitos de espacio para la instalación de los nodos, y facilitar la instalación de la red con miles de nodos.

Las LWSN funcionan con señales de baja potencia y son altamente sensibles al ruido, por lo tanto, la resistencia al ruido es importante. Por lo general los lugares por donde pasa la infraestructura lineal tienen mínima interferencia, ya que los lugares no son habitados (fronteras y carreteras) en comparación con WSN industriales las cuales están afectadas por el ruido [25].

El consumo de energía puede considerarse desde dos puntos de vista: bajo consumo de energía y consumo eficiente de

energía, el bajo consumo de energía está relacionado con el consumo de las baterías de los nodos y el consumo eficiente de energía está relacionado con el aumento de la eficiencia energética de toda la LWSN la cual se compone de varios nodos, por lo tanto, se debe equilibrar la carga sobre la red, situación que se ve influenciada por la estructura lineal, ya que los nodos más cercanos a los nodos frontera consumirán más energía por la retransmisión de los paquetes que provienen de nodos internos [26].

La autoconfiguración es un tema importante en WSN [27] en especial en LWSN que deben estar diseñadas para autoconfigurarse, autoorganizarse y operar sin la intervención humana durante largos períodos de tiempo. La operación autónoma es uno de los requisitos principales ya que algunos nodos de la infraestructura lineal pueden estar desplegados en ubicaciones difíciles de acceder, en condiciones difíciles como climas extremadamente fríos y en desiertos.

Es necesario que una LWSN sea tolerante y robusta contra fallas de enlaces y nodos, debido a la energía limitada y a que existe un único camino para llegar al colector de datos. La red debe construirse de manera tal que la falla de uno o unos pocos nodos, no resulte en la falla de toda la red [28]. La falla en un enlace lleva a una gran pérdida de paquetes y un alto retraso por retransmisiones. Por lo tanto, para superar las fallas del enlace se deben usar técnicas de retransmisión eficientes en la capa de enlace o la capa de transporte.

El retardo extremo a extremo es un parámetro que debe ser minimizado en general para todas las WSN [29] y de manera particular en las LWSN que se componen de miles de nodos, especialmente si la aplicación de las redes está relacionado con los sistemas de control que requieren un comportamiento predecible de la red y garantías para su funcionamiento en tiempo real.

En las LWSN todos los nodos son iguales y por lo general monitorean los mismos parámetros, por lo que, la existencia de una diferenciación de servicio no es necesaria. La fiabilidad, la latencia y la disponibilidad son requisitos críticos para la calidad de servicio que las LWSN deben satisfacer para las aplicaciones.

La escalabilidad se puede ver desde dos perspectivas diferentes. El diseño de protocolos y estándares debe permitir su escalabilidad en el tiempo para cumplir con los diferentes requisitos de las aplicaciones que evolucionan constantemente, por otra parte las LWSN deben ser escalables para permitir la adición o eliminación de numerosos nodos sensores y permitan la adición de nuevas funcionalidades en los miles de nodos sensores que forman parte de la infraestructura lineal. Por lo tanto, LWSN deben ser lo suficientemente escalables para adaptarse a estos requerimientos sin degradar la calidad de servicio.

Con relación al flujo de tráfico, las características de una LWSN implican que varios nodos sensores en la infraestructura lineal generan datos, los cuales son enviados a un solo nodo recolector de datos que los procesa [23].

Los protocolos existentes a nivel de aplicación de las redes inalámbricas de sensores pueden ser reutilizables en LWSN, pero estos protocolos están dirigidos predominantemente a

aplicaciones con varios procesos a nivel de aplicación. En las redes con estructuras lineales a gran escala, la posibilidad de que existan varias aplicaciones ejecutándose en un nodo sensor es mínima por lo tanto existe la necesidad de protocolos específicos para LWSN [30].

C. Estándares para WSN

Los estándares o arquitecturas para las redes inalámbricas de sensores utilizados en la actualidad son:

WirelessHART es un estándar que se basa en el protocolo IEEE 802.15.4, utiliza TDMA (Time Division Multiple Access) para acceso al canal y fue desarrollado por Dust Networks [31] para el control de acceso al medio y con funciones de capa de red. WirelessHART se considera confiable, robusto y eficiente en el consumo de energía. Sin embargo, las topologías de red admitidas por el estándar WirelessHART son estrella y malla.

ISA100.11a. es un estándar [32] que proporciona una comunicación sólida y segura para aplicaciones en automatización de procesos. Similar a WirelessHART, se basa en IEEE 802.15.4. En la capa de enlace de datos, combina TDMA con CSMA (Carrier Sense Multiple Access) para aprovechar las ventajas de ambas soluciones. En la capa de red, la compatibilidad con IPv6 brinda mejores oportunidades de conectividad con Internet. ISA100.11a admite topologías de red estrella y malla.

WIA-PA es un estándar industrial propuesto por la Alianza Inalámbrica Industrial China con el objetivo de proporcionar una solución para redes inalámbricas de sensores de múltiples saltos con alta confiabilidad, eficiencia energética e inteligente [33]. Es totalmente compatible con el estándar IEEE 802.15.4 y está diseñado para proporcionar una red de malla con autoorganización y autoconfiguración. La capa de control de acceso al medio es compatible con IEEE 802.15.4 y utiliza las tecnologías CSMA, TDMA y FDMA (Frequency Division Multiple Access) para acceso medio.

6LoWPAN (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks) [34] es un estándar abierto definido por la IETF (Internet Engineering Task Force) en su documento RFC 6282 [35]. Fue concebido originalmente para operar sobre IEEE 802.15.4, es un estándar que establece las capas inferiores para un sistema inalámbrico de baja potencia de 2.4 GHz. Tiene definido los mecanismos de encapsulación y compresión que permiten transportar los datos IPv6 de la red inalámbrica en cualquier tipo de topología.

ZigBee es un estándar de comunicaciones diseñado para operar en los niveles de aplicación y de red, que hace uso del estándar IEEE 802.15.4 a nivel de enlace. Permite implementar redes seguras, de muy bajo costo y muy bajo consumo de energía inalámbrico [36]. Proporciona capacidad de enrutamiento para trabajar con cualquier tipo de topología.

Las LWSN forman parte de las redes inalámbricas de sensores, por lo tanto, las implementaciones de las redes con topología lineal utilizan los estándares existentes que trabajan con redes multisalto y miles de nodos. Sin embargo, se requiere estándares específicos para LWSN que permitan satisfacer los requerimientos más estrictos relacionados con la

baja potencia, alta confiabilidad, bajo retardo, fácil implementación, administración y mantenimiento.

III. CONTROL DE ACCESO AL MEDIO

Los protocolos para el control de acceso medio son responsables de controlar la compartición del canal y decidir sobre la forma de la comunicación entre los nodos sensores. Existen varios métodos que se pueden clasificar en tres clases principales [12] los cuales se describen a continuación. En los protocolos de asignación fijos, los recursos disponibles se distribuyen específicamente entre los nodos sensores y esta división es aplicable durante un período de tiempo definido. Los protocolos de asignación por demanda, en el cual los recursos se asignan al nodo bajo demanda con un control centralizado o distribuido. Los protocolos de acceso aleatorio, en los cuales los recursos disponibles se asignan de manera aleatoria lo cual se adapta al tráfico explosivo y a los cambios dinámicos en la topología. Los protocolos híbridos utilizan protocolos de asignación fijos o protocolos de asignación de demanda junto con protocolos de acceso aleatorio. Estos protocolos combinan CSMA y TDMA para explotar sus ventajas. Un ejemplo es el estándar IEEE 802.15.4 con su modo de operación no ranurado [37].

A. TDMA vs CSMA

En la mayoría de las implementaciones de las redes inalámbricas de sensores se utiliza CSMA, que se basa en contenciones y TDMA que se basa en reservas de tiempo, sin embargo, en LWSN para considerar la utilización de una de las dos, se deben considerar las siguientes características propias de este tipo de redes.

Existen pocos nodos dentro de la zona de cobertura de un nodo sensor que forma parte de la infraestructura lineal, cada uno de ellos genera datos de manera aleatoria o con un período bajo, las colisiones por las posibles retransmisiones de nodos intermedios son mínimas lo cual facilita el uso de la técnica simple de acceso como es CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) en lugar de TDMA. Si bien TDMA utiliza el ancho de banda más eficientemente bajo cargas altas, en las aplicaciones de las LWSN el tráfico es muy bajo a pesar de que todos los nodos tienen que enviar periódicamente información de monitoreo.

Es importante considerar los principales problemas para implementar aplicaciones en redes con estructuras lineales a gran escala como son la precisión, la previsibilidad y la sensibilidad al retraso, estos problemas se pueden abordar de manera eficiente mediante esquemas CSMA/CA, ya que el aplicar TDMA para pocos nodos que están dentro de la zona de cobertura no es eficiente, además es muy complejo sincronizar miles de nodos para un acceso TDMA que están en diferentes zonas de cobertura, sincronización que se convierte en un reto tecnológico [38].

CSMA/CA tiene un alto grado de confiabilidad en escenarios con pocos nodos dentro de la misma zona de cobertura y bajo tráfico. Aunque el CSMA/CA es eficiente en energía con pocos nodos, sin embargo, el nodo debe funcionar en estado de recepción todo el tiempo.

Con estos antecedentes, la implementación de TDMA en redes con infraestructuras lineales a gran escala no es óptima.

B. Consideraciones de diseño en la implementación

La comunicación entre nodos debe tener en cuenta la topología, el tráfico, y el número de nodos desplegados, para de esta manera diseñar un protocolo eficiente para el nivel de enlace.

En una LWSN, se puede minimizar la longitud de la cabecera de la unidad de datos, en el caso de los protocolos del nivel de enlace, se puede aprovechar la ventaja de tener pocos nodos dentro de la zona de cobertura para optimizar el direccionamiento de los nodos, al ser una topología lineal los procesos de enrutamiento pueden simplificarse. Al nivel de transporte al tener una sola aplicación de monitoreo o de alarma se puede prescindir del identificador de puerto. Estos antecedentes propuestos, permiten considerar la simplificación de las cabeceras lo cual beneficia en el consumo de energía por procesamiento, ancho de banda y tiempos de retardo por procesamiento en los nodos.

Los nodos sensores a nivel de enlace, trabajan en los modos de transmisión, recepción e inactivo. Una selección adecuada del modo de trabajo puede reducir la cantidad de energía utilizada [39]. Sin embargo, el modo de operación afecta la latencia. Operar en el modo inactivo da como resultado un bajo consumo de energía, pero una alta latencia.

La comunicación multicanal, que utiliza diferentes canales de frecuencia, es un método eficaz para reducir los efectos de la interferencia en el medio inalámbrico mediante la selección del canal que tenga menos interferencia [40]. En el caso de la LWSN se caracterizan porque muchas aplicaciones como el monitoreo de oleoductos, carreteras, la mayoría de los nodos están ubicados en zonas rurales por donde pasan estas infraestructuras lineales y la interferencia es mínima.

Alejándose de los enfoques tradicionales de una arquitectura en capas y protocolos, los investigadores proponen la implementación de capas cruzadas, estas propuestas son ventajosas sobre los enfoques tradicionales [41] en nodos con limitaciones de cómputo. Al explotar la información de otras capas, los protocolos pueden tomar decisiones más eficientes y en menos tiempo. La ventaja de este enfoque es que permite optimizar los recursos de cómputo. En una topología lineal, puede ser necesario eliminar la capa de red, o tener protocolos de enrutamiento con funciones simplificadas.

La diferenciación de servicios es una función que se proporciona en capa de enlace con protocolos híbridos que utilizan CSMA y TDMA [42], y priorizar los nodos que deben transmitir, en LWSN no es muy crítica esta función ya que dentro de toda la zona de cobertura de un nodo, existen pocos nodos y todos los nodos de la infraestructura lineal tienen la misma importancia.

Definitivamente las colisiones en una LWSN con pocos nodos dentro de la zona de cobertura son mínimas por lo que la utilización de procesos tendientes a minimizar el efecto de las colisiones no requiere de protocolos complejos. Con el acceso aleatorio al canal basado en contención, la posibilidad

de colisión es baja con pocos nodos.

C. *Protocolos de enlace de datos para LWSN*

El protocolo MFT-MAC (Multi frame transmission MAC) [43] es un protocolo de acceso al medio basado en contención, que reenvía múltiples tramas de datos a través de múltiples saltos en tiempos sincronizados para reducir el consumo de energía sin modificar el retardo de extremo a extremo. El protocolo está bien adecuado para aplicaciones de recopilación de datos, en las que los nodos sensores tienen que llegar al nodo sumidero a través de múltiples saltos en una topología lineal.

El protocolo DiS-MAC (Directional Scheduled MAC) [44] es un protocolo que garantiza una comunicación sin colisiones entre nodos sensores sincronizados, dispuestos en una topología lineal. Utiliza las ventajas de antenas direccionales, mayores ganancias, rangos más largos entre nodos que forman parte de la zona de cobertura y elimina la interferencia y colisiones, para lo cual se apunta el haz de radio en la dirección deseada. Aunque es un protocolo basado en contención, las antenas direccionales permiten a los nodos evitar colisiones y resolver problemas terminales ocultos, y reduce los paquetes de control.

WiWi [45] es un protocolo MAC sin contención basado en transmisión síncrona de múltiples saltos a lo largo de una cadena de nodos independientes con paquetes de tamaño fijo. Cada nodo sincroniza su reloj cada vez que recibe un paquete. Una vez que un nodo es sincronizado su actividad se planifica para recibir, transmitir o estar inactivo independientemente de su posición en la cadena. Para que no existan colisiones el nodo espera un definido número de intervalos de tiempo para volver a transmitir. No se requiere direccionamiento explícito porque hay un solo nodo receptor.

El protocolo LINE-MAC [15] diseñado para topologías lineales multsalto, considera la actividad del canal y aumenta la eficiencia energética, configura al nodo con el modo inactivo el momento que el canal no tiene actividad. Los nodos vecinos se despiertan por un pequeño período de tiempo y retransmiten el mensaje esto minimiza la posibilidad de una colisión. El momento que un nodo tiene más de un paquete de datos, le comunica al siguiente nodo, y de esta manera controlar el tráfico en la red.

El protocolo LC-MAC (Long-chain MAC) [46] reserva anticipadamente los recursos de los nodos que van a retransmitir, para reducir el retardo de extremo a extremo, y tener una eficiencia energética, para lo cual envía una trama de sincronización por los nodos de la red y planifica la próxima entrega de paquetes de datos a lo largo de la ruta de la topología lineal. Cada nodo retransmisor está inactivo, y se pone en estado de recepción en un tiempo determinado, de tal manera que pueda reenviar la trama.

IV. ENRUTAMIENTO

En cualquier caso, como toda red, en una LWSN se requiere una gestión eficiente para satisfacer los requisitos de calidad de servicio. Los requisitos de diseño de protocolos de enrutamiento [47] están enfocados a satisfacer las necesidades

de calidad de servicio en redes multsalto con topología malla y árbol. Los objetivos de enrutamiento para redes con una única ruta física son totalmente diferentes en comparación a las redes que disponen de varias rutas. A continuación, se describen las características de enrutamiento para LWSN.

La tolerancia a fallas es muy importante, los nodos de una LWSN funcionan con baterías, el desgaste de la batería es una de las principales causas del fallo de la red. En este caso el protocolo de enrutamiento es responsable de identificar estas fallas y definir un nodo alternativo y no una ruta alternativa, debido a la existencia de una sola ruta al nodo frontera.

Uno de los requisitos más importantes de LWSN es la eficiencia energética debido a la capacidad limitada de las baterías. En una red de múltiples saltos, los nodos sensores tienen dos funciones: enviar datos que se originan en el nodo sensor y reenviar datos provenientes de otro nodo. Los protocolos de enrutamiento deben considerar métodos para reducir el consumo de energía mediante la utilización de diferentes nodos que forman parte de la única ruta para que el consumo de energía sea eficiente.

El balanceo de la carga de tráfico en el nodo y en el enlace, es importante para aumentar el tiempo de vida de la red. Los nodos que están más cerca de los nodos frontera en una topología lineal tienen una alta carga de tráfico, lo que resulta en el agotamiento temprano de la batería y por lo tanto el fallo del nodo. Esto da como resultado un mayor retardo y pérdida de paquetes de datos. Por lo tanto, deben emplearse técnicas eficientes de equilibrio de carga que seleccionen diferentes nodos retransmisores.

Las aplicaciones definen el período en el cual los nodos transmiten o retransmiten los datos. Se puede tener un envío de datos controlado por el tiempo, en la cual los nodos sensores recopilan datos continuamente y los envían de forma periódica. Otra forma de enviar los datos es impulsado por eventos, en la cual, los datos se recopilan continuamente pero se envían solo si los datos tienen una importancia especificada previamente, el momento de ocurrencia de un evento es impredecible, y por último los datos se envían impulsados por una consulta en la cual los datos se recopilan continuamente, pero solo se envían el momento que el receptor los solicita.

El enrutamiento puede realizarse en función de prioridades, para lo cual proporciona una diferenciación del servicio a un paquete. En el caso de una LWSN todos los nodos generan alarmas o monitorean los datos con la misma prioridad y monitorean los mismos eventos a lo largo de la infraestructura lineal por lo tanto la diferenciación de servicio no es crítica.

A. *Protocolos de enrutamiento para LWSN*

El protocolo 6LowPAN que permite el envío de paquetes IPv6 sobre IEEE 802.15.4, en redes con diferentes topologías, utiliza el protocolo de enrutamiento RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks) [48] que se basa en el modelo multsalto, en el cual, un nodo que transmite a la estación base primero transmite los datos a un nodo vecino hasta que llega al destino.

El estándar Zigbee implementa en la capa de red el algoritmo de ruteo bajo demanda con el protocolo AODV

(Ad-hoc On-demand Distance Vector) , el cual permite implementar redes con diferentes topologías multisalto [49]. En AODV, los nodos mantienen una tabla de ruteo para los destinos conocidos. En el comienzo esta tabla la integran sus vecinos. Solo se agrandará la tabla el instante que aparezca algún nodo con ruta desconocida. En este caso, se envía mensajes de descubrimiento que se propagan entre los nodos hasta llegar al destino. Desde el destino se inicia el camino inverso hasta llegar al nodo origen. Todos los nodos actualizarán sus tablas, esta característica resulta adecuada si se trata de redes multisalto con miles de saltos.

Los protocolos AODV y RPL [50] diseñados para proveer de enrutamiento en topologías complejas pueden ser utilizados en topologías lineales y de esta manera permitir la conectividad de LWSN con la red internet de manera transparente, sin embargo, falta analizar su comportamiento en redes multisalto con miles de saltos.

V. TRANSPORTE

Los protocolos de transporte son responsables de mejorar la confiabilidad y evitar la congestión [51]. Para solicitar una entrega de datos confiables en una LWSN es necesario detectar la pérdida de paquetes y permitir la retransmisión de paquetes perdidos. A continuación, se discuten las características del protocolo de transporte aplicado a las LWSN.

En base a un escenario general de una LWSN con múltiples fuentes y un único sumidero, la confiabilidad puede establecerse en dos direcciones: primero la confiabilidad de los paquetes desde el nodo sensor al colector de datos y del colector de datos al nodo sensor. El protocolo de transporte ideal debe tener confiabilidad en ambos flujos de transmisión.

La detección de pérdida de un paquete puede estar en el lado del remitente o en el lado del receptor. En el lado del nodo sensor, la detección de pérdidas se realiza con el uso de un temporizador el cual establece el tiempo máximo anticipado requerido para el viaje de ida y vuelta. En el lado del colector de datos, la pérdida se observa el momento que llegan paquetes fuera de secuencia.

La notificación de pérdida es fundamental, cada paquete tiene un número de secuencia único, este número de secuencia es utilizado por el receptor para enviar un paquete de confirmación al nodo sensor y de esta manera notificar la recepción del paquete. Si el nodo sensor no recibe esta notificación dentro de cierto tiempo, retransmite el paquete y que asume la pérdida del paquete. Las confirmaciones positivas (ACK) se utilizan para confirmar los paquetes recibidos. Estos reconocimientos pueden ser implícitos denominados iACK (implicit ACK) o explícitos eACK (explicit ACK). Para eACK, el receptor envía explícitamente acuses de recibo, en iACK, los nodos escuchan los paquetes que se reenvían. Bajo ciertas condiciones, se ha comprobado que el uso de confirmaciones implícitas producen mejores resultados que las explícitas para tener confiabilidad en WSN. [52].

El procedimiento de recuperación de pérdidas se puede realizar de extremo a extremo en la cual, el nodo fuente y el

colector de datos son responsables de la detección y recuperación de pérdidas, o de nodo a nodo. Hay que tomar en cuenta que la capa de enlace realiza la retransmisión de nodo a nodo. El método de nodo a nodo se considera más adecuado para LWSN que el método de extremo a extremo [53]. Los problemas de aumento de retardo y consumo de energía, al usar estas dos técnicas, han sido comparados [54], y se demostrado que el enfoque de nodo a nodo es el que se debe utilizar en LWSN.

En base al tipo de tráfico en una LWSN, la congestión más probable ocurre en los nodos cercanos al nodo frontera por una mayor retransmisión de paquetes que estos nodos deben realizar. Los métodos normales de controlar la congestión como un ajuste de la velocidad de transmisión en el nodo de origen, no es aplicable en LWSN por la naturaleza de las aplicaciones, la redirección de tráfico no es una alternativa.

A. Protocolos de transporte para LWSN

Se han propuesto algunos protocolos de transporte para redes inalámbricas de sensores [55], sin embargo, para LWSN a gran escala no existen protocolos específicos. El protocolo MQTT (Message Queing Telemetry Transport) [56] es un protocolo ligero que necesita de TCP-IP para funcionar en aplicaciones para Internet de las Cosas, a pesar que el protocolo MQTT es ligero, no es adecuado para dispositivos que no pueden implementar los protocolos TCP-IP por sus limitaciones de cómputo como es el caso de las redes inalámbricas de sensores. Es por esa razón que apareció el protocolo MQTT-SN (MQTT for sensor networks) [57] diseñado específicamente para redes de sensores, no depende de TCP-IP para operar, ya que puede implementarse sobre cualquier capa de transporte o de red [58].

VI. DESAFÍOS E INVESTIGACIONES FUTURAS

A continuación, se presentan nuevos desafíos y direcciones futuras de investigación que se considera importantes desde la perspectiva de las LWSN.

Con los avances en la investigación de redes inalámbricas de sensores industriales y redes inalámbricas sensoras y actuadoras se han propuesto varios estándares, los cuales no cubren óptimamente las necesidades de las LWSN a gran escala. Por lo que el minimizar los retardos y el consumo de energía de los nodos se convierten en nuevos desafíos que aún no se han resuelto.

6LowPAN puede ser utilizado en LWSN, sin embargo, no existen estudios del comportamiento de este protocolo ante fallas, para validar su funcionalidad en redes con cientos de saltos. La implementación de algoritmos complejos en una topología lineal puede ocasionar altos tiempos de convergencia el momento que ocurre una falla en el enlace o en el nodo, y como consecuencia se tiene pérdida de paquetes.

La escalabilidad es un tema importante, si se desea utilizar TDMA en LWSN a gran escala, la necesidad de sincronización de los miles de nodos para proporcionar calidad de servicio es un desafío.

El método de confirmación de nodo a nodo se prefiere sobre el método de extremo a extremo para LWSN y en otros tipos

de topología [59]. Con una alta probabilidad de pérdida de enlace o nodo, los retardos totales con la utilización de la técnica salto por salto son menores que de extremo a extremo, por lo tanto, dejar la confiabilidad del transporte de datos de extremo a extremo al nivel de enlace es un desafío.

El diseño de LWSN debe permitir una coexistencia con otros estándares inalámbricos. Sin embargo, la gran cantidad de nodos, los mecanismos de autoconfiguración y la presencia de una única ruta afectan a la calidad de servicio de los protocolos y estándares existentes. Por lo tanto, se requiere el desarrollo de mecanismos más efectivos para resolver problemas de coexistencia.

La previsibilidad es uno de los principales requisitos en las LWSN, redes que por naturaleza son complejas, el no determinismo y la imprevisibilidad en el cumplimiento de los objetivos de los niveles de red en LWSN, requeridas por las aplicaciones, hacen que la comunicación sea impredecible [60]. Por lo tanto, es un desafío crear protocolos que permitan la previsibilidad.

Por último, su integración con enfoques futuros [61] como la computación de niebla [62], la computación en la nube [63] y el análisis de gran cantidad de datos [64] con el propósito de extender el desarrollo de sistemas ubicuos con dispositivos heterogéneos que se integren a tecnologías de comunicación interoperables, es un desafío.

VII. RESUMEN Y CONCLUSIÓN

En este artículo se analiza las características del control de acceso medio, enrutamiento y transporte en LWSN. La evaluación se basó en las características de LWSN y sus requisitos. Se analiza los estándares y protocolos existentes para ser usados en este tipo de redes. En lo referente al enrutamiento, es claro que todos los protocolos existentes solucionan problemas de enrutamiento basados en redes con múltiples rutas, lo que les convierte en soluciones no óptimas en topologías lineales y porque no es necesario clasificar el tráfico dentro de la red ya que todos los nodos generan los mismos tipos de mensajes con la misma prioridad.

La optimización del retardo y el consumo de energía de nodos cercanos a los extremos en la infraestructura lineal es un desafío. Para el nivel de transporte, se considera solo una aplicación a ejecutarse en los nodos, el transporte de datos de extremo a extremo no es complejo sin embargo la confiabilidad de extremo a extremo es un problema a resolver. Lo principal es adaptar el funcionamiento de los nodos sensores que forman parte de la estructura lineal, con protocolos de transporte existentes como MQTT-SN para permitir su operación con nodos del Internet.

Los sistemas de alerta funcionan de manera similar a los sistemas de seguridad, pero con la diferencia de que no se requiere ninguna acción de emergencia en el evento que ha activado la alerta. El diseño del control de acceso al medio debe considerar pocos nodos en la zona de cobertura con más enfoque en la eficiencia energética de la red. Los procesos de enrutamiento son mínimos, y prácticamente no es necesario incluir el nivel de red, con estos antecedentes se propone que los procesos ante un nodo fallido y enlace ruidoso pueden ser

satisfechos a nivel de enlace.

En los sistemas de monitoreo la eficiencia energética y el equilibrio de carga en los nodos retransmisores son requisitos principales en topologías lineales, ya que se requiere que recopilen datos en períodos prolongados. La función de transporte se relaciona con la compatibilidad con nodos de la red Internet, debido a los requisitos de confiabilidad reducidos, a las características del ambiente, en donde se implementa la infraestructura lineal, que no tiene mucho ruido externo porque son mínimas las señales de otras redes que operan a la misma frecuencia.

El objetivo del artículo es discutir las redes inalámbricas de sensores desde una perspectiva asociada con topologías lineales con aplicaciones de sistemas de monitoreo y alerta. Los requisitos importantes de las LWSN se discuten brevemente y también se agregan algunos requisitos que se consideran importantes. Esto fue seguido por una discusión sobre el estado del arte para LWSN y sus perspectivas futuras. Luego, se discuten varias funciones como el control de acceso medio, el enrutamiento y el transporte, que son la fuerza impulsora para satisfacer los requisitos de los sistemas con infraestructuras lineales. Junto con sus requisitos específicos. Se discuten algunos protocolos representativos que apuntan a cumplir con los requisitos establecidos y que pueden modificarse adecuadamente para ajustarse a los estándares a este tipo de redes. La utilización de protocolos existentes que proporcionen conectividad es un reto en la implementación, por el retardo y consumo de energía.

El retardo es el principal tema propuesto para ser investigado, conjuntamente con los tiempos de convergencia ante fallos en nodos y enlaces.

Hay una necesidad de crear estándares y protocolos específicos para esta clase de redes que satisfagan sus requerimientos. Crear un estándar desde cero que permita interoperar con otros estándares para redes inalámbricas de sensores es una tarea lenta pero interesante. Es necesario estudiar los cambios requeridos a los protocolos existentes para WSN para satisfacer los requisitos de LWSN.

REFERENCIAS

- [1] P. Rawat, K. D. Singh, H. Chaouchi, and J. M. Bonnin, "Wireless sensor networks: A survey on recent developments and potential synergies," *The Journal of Supercomputing*, vol. 68, pp. 1-48, Oct. 2014.
- [2] I. Khemapech, I. Duncan, and a Miller, "A survey of wireless sensor networks technology," in 6th Annual PostGraduate. Symposium on The Convergence of Telecommunications, Networking & Broadcasting, vol. 13, Jun. 2005.
- [3] S. Saadaoui, M. Tabaa, F. Monteiro, M. Chehaitly, A. Dandache, and A. Oukaira, "IWSN under an industrial wireless channel in the context of Industry 4.0," in *Proceeding of the 29th International Conference on Microelectronics*, Beirut, Lebanon, Dec. 2017, pp. 1-4.
- [4] N. Primeau, R. Falcon, R. Abielmona and E. M. Petriu, "A Review of Computational Intelligence Techniques in Wireless Sensor and Actuator Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 4, pp. 2822-2854, Fourthquarter 2018.
- [5] S. V. R. K. Rao, M. Saritha Devi, A. R. Kishore, and P. Kumar, "Wireless sensor Network based Industrial Automation using Internet of Things (IoT)," *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, vol. 7, no. 6, pp. 82-86, Jan. 2018.

- [6] O. Ojuroye, R. Torah, S. Beeby, and A. Wilde, "Smart Textiles for Smart Home Control and Enriching Future Wireless Sensor Network Data," *Sensor for Everyday Life*, vol. 22, pp. 159-183, Oct. 2017.
- [7] A. Alaiad and L. Zhou, "Patients' Adoption of WSN-Based Smart Home Healthcare Systems: An Integrated Model of Facilitators and Barriers," *IEEE Transactions on Professional Communication*, vol. 60, no. 1, pp. 4-23, Mar. 2017.
- [8] M. S. Adam, M. H. Anisi, and I. Ali, "Object tracking sensor networks in smart cities: Taxonomy, architecture, applications, research challenges and future directions," *Future Generation Computer Systems*, vol. 107, pp. 909-923, Jun. 2020.
- [9] C. M. Imran, M. Aldukhail, N. Almezeini, and M. Alnuem, "Potential Applications of Linear Wireless Sensor Networks: A Survey," *International Journal of Computer Networks and Communications Security*, vol. 4, no. 6, pp. 183-200, Jun. 2016.
- [10] R. Katona, V. Cionca, D. O'Shea and D. Pesch, "Exploring the economical benefits of virtualized wireless sensor networks," in *IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Montreal, QC, Canada, Oct. 2017, pp. 1-5.
- [11] *Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, IEEE, 2006.
- [12] H. Karl and A. Willig, "Network Architecture," in *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*, Hoboken, NJ, USA, Wiley, 2005, pp. 69-8.
- [13] J.-P. Vasseur and A. Dunkels, "Non-IP Smart Object Technologies" in *Interconnecting Smart Objects with IP: The Next Internet*. Burlington, MA, USA, Morgan, 2010, pp 21-28.
- [14] A. Bachir, M. Dohler, T. Watteyne and K. K. Leung, "MAC Essentials for Wireless Sensor Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 12, no. 2, pp. 222-248, Second Quarter 2010.
- [15] R. Sokullu and E. Demir, "Investigating energy efficiency and timeliness for linear wireless sensor networks," *Procedia Computer Science*, vol. 37, pp. 24-31, Sep. 2014.
- [16] I. Jawhar, N. Mohamed, and D. P. Agrawal, "Linear wireless sensor networks: Classification and applications," *Journal of Network and Computer Application*, vol. 34, no. 5, pp. 1671-1682, Sep. 2011.
- [17] M. Hammoudeh *et al.*, "A Wireless Sensor Network Border Monitoring System: Deployment Issues and Routing Protocols," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 8, pp. 2572-2582, Apr. 2017.
- [18] A. Ayadi, O. Ghorbel, A. Obeid, M. S. Bensaleh and M. Abid, "Leak detection in water pipeline by means of pressure measurements for WSN," in *International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*, Fez, Morocco, May. 2017, pp. 1-6.
- [19] H. Ali and J. H. Choi, "A Review of Underground Pipeline Leakage and Sinkhole Monitoring Methods Based on Wireless Sensor Networking," *Sustainability, MDPI, Open Access Journal*, vol. 11(15), pp. 1-24, Jul. 2019.
- [20] Z. Ye, X. Tong, H. Yang, L. Meng, W. Xue, and L. Wang, "The Strip Clustering Scheme for data collection in large-scale Wireless Sensing Network of the road," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 11, no. 2, pp. 138-145, Mar. 2018.
- [21] L. Muduli, P. K. Jana, and D. P. Mishra, "A novel wireless sensor network deployment scheme for environmental monitoring in longwall coal mines," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 109, pp. 564-576, Jul. 2017.
- [22] N. Zhang, X. Zhang, H. Liu, and D. Zhang, "Optimization Scheme of Forming Linear WSN for Safety Monitoring in Railway Transportation," *International Journal of Computer Communications & Control*, vol. 9, no. 6, pp. 800-810, Oct. 2014.
- [23] M. Abdelhafidh, M. Fourati, L. C. Fourati, and A. Laabidi, "An investigation on wireless sensor networks pipeline monitoring system," *International Journal of Wireless and Mobile Computing (IJWMC)*, vol. 14, no. 1, pp. 25-46, Feb. 2018.
- [24] P. S. Girão, "Wireless sensor networks," in *22nd IMEKO TC4 International Symposium and 20th International Workshop on ADC Modelling and Testing 2017: Supporting World Development Through Electrical and Electronic Measurements*, vol. 1, pp. 562-569, Sep. 2017.
- [25] S. Lee and M. Younis, "QoS-aware Relay node Placement for connecting disjoint segments in wireless sensor networks," in *6th IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems Workshops (DCOSSW)*, Santa Barbara, CA, USA, Jun. 2010, pp. 1-6.
- [26] J. Skulic, A. Gkelias and K. K. Leung, "Node placement in linear Wireless Sensor Networks," in *21st European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2013)*, Marrakech, Morocco, Sep. 2013, pp. 1-5.
- [27] N. T. Dinh and Y. Kim, "Auto-configuration in wireless sensor networks: A review," *Sensors*, vol. 19, no. 19, pp. 4281-4290, Oct. 2019.
- [28] S. Ali *et al.*, "SimpliMote: A Wireless Sensor Network Monitoring Platform for Oil and Gas Pipelines," *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 778-789, Mar. 2018.
- [29] M. Doudou, D. Djenouri and N. Badache, "Survey on Latency Issues of Asynchronous MAC Protocols in Delay-Sensitive Wireless Sensor Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 2, pp. 528-550, Second Quarter 2013.
- [30] J. Eze, C. Nwagboso, and P. Georgakis, "Framework for integrated oil pipeline monitoring and incident mitigation systems," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 47, pp. 44-52, Oct. 2017.
- [31] J. Ma, H. Wang, D. Yang "Challenges: From Standards to Implementation for Industrial Wireless Sensor Networks," *Journal of Distributed Sensor Network*, vol. 12 no. 2, Feb. 2016.
- [32] F. P. Rezha and S. Y. Shin, "Performance evaluation of ISA100.11A industrial wireless network," in *IET International Conference on Information and Communications Technologies (IETICT 2013)*, Beijing, China, Apr. 2013, pp. 587-592.
- [33] H. Wang, Q. Wang, M. Li and T. Shi, "An Edge Computing Based Gateway for WIA-PA Networks," in *Chinese Automation Congress (CAC)*, Hangzhou, China, Nov. 2019, pp. 249-254.
- [34] Compression Format for IPv6 Datagrams over IEEE 802.15.4-Based Networks, IETF, 2011. [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6282.txt.pdf>.
- [35] H. A. A. Al-Kashoash, H. Kharrufa, Y. Al-Nidawi, and A. H. Kemp, "Congestion control in wireless sensor and 6LoWPAN networks: toward the Internet of Things," *Wireless Networks*, pp. 4493-4522, May 2018.
- [36] Manpreet and J. Malhotra, "ZigBee technology: Current status and future scope," in *International Conference on Computer and Computational Sciences (ICCCS)*, Noida, India, Jan. 2015, pp. 163-169.
- [37] A. G. Ramonet and T. Noguchi, "IEEE 802.15.4 Historical Evolution and Trends," in *21st International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, PyeongChang Kwangwoon_Do, Korea (South), Feb. 2019, pp. 351-359.
- [38] M. Chitnis, P. Pagano, G. Lipari and Y. Liang, "A Survey on Bandwidth Resource Allocation and Scheduling in Wireless Sensor Networks," in *International Conference on Network-Based Information Systems*, Indianapolis, IN, USA, Aug. 2009, pp. 121-128.
- [39] N. Barroca, P. T. Gouveia, and F. J. Velez, "Impact of Switching Latency Times in Energy Consumption of IEEE 802.15.4 Radio Transceivers," in *9th Conference on Telecommunications*, May 2013.
- [40] S. Chouikhi, I. El Korbi, Y. Ghamri-Doudane, and L. Azouz Saidane, "Distributed connectivity restoration multichannel wireless sensor networks," *Journal of Computer Networks*, vol. 127, no. 9, pp. 282-295 Nov. 2017.
- [41] I. Al-Anbagi, M. Erol-Kantarci and H. T. Mouftah, "A Survey on Cross-Layer Quality-of-Service Approaches in WSNs for Delay and Reliability-Aware Applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 1, pp. 525-552, Firstquarter 2016.
- [42] M. H. S. Gilani, I. Sarrafi, and M. Abbaspour, "An adaptive CSMA/TDMA hybrid MAC for energy and throughput improvement of wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol 1, no. 4, pp. 1297-1304, Jun. 2013.
- [43] E. Lee, J. W. Jwa, and H Kim, "MFT-MAC: A duty-cycle MAC protocol using multiframe transmission for wireless sensor networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 9 no. 9 Sep. 2013.
- [44] T. Karveli, K. Voulgaris, M. Ghavami and A. H. Aghvami, "DiS-MAC: A MAC protocol for sensor networks used for roadside and highway monitoring," in *International Conference on Ultra Modern Telecommunications & Workshops*, St. Petersburg, Russia, Oct. 2009, pp. 1-6.

- [45] D. De Caneva, "A Synchronous and Deterministic MAC Protocol for Wireless Communications on Linear Topologies," *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, vol. 3, no. 1, pp. 925-933, Jan. 2010.
- [46] C. Fang, H. Liu and L. Qian, "LC-MAC: An Efficient MAC Protocol for the Long-Chain Wireless Sensor Networks," in *Third International Conference on Communications and Mobile Computing*, Qingdao, China Apr. 2011, pp. 495-500.
- [47] S. K. Gupta, S. Kumar, S. Tyagi, and S. Tanwar, "Energy Efficient Routing Protocols for Wireless Sensor Network," in *Handbook of Wireless Sensor Networks: Issues and Challenges in Current Scenario's.*, Springer, Berlin, vol 1132, 2020, pp. 275-298.
- [48] H. Xie, G. Zhang, D. Su, P. Wang and F. Zeng, "Performance evaluation of RPL routing protocol in 6lowpan," in *IEEE 5th International Conference on Software Engineering and Service Science*, Beijing, China, Jun. 2014, pp. 625-628.
- [49] H. Fitriawan, M. Susanto, A. S. Arifin, D. Mause and A. Trisanto, "ZigBee based wireless sensor networks and performance analysis in various environments," in *15th International Conference on Quality in Research (QIR) : International Symposium on Electrical and Computer Engineering*, Nusa Dua, Indonesia, Jul. 2017, pp. 272-275.
- [50] A. Muthanna, A. Prokopiev, A. Paramonov and A. Koucheryavy, "Comparison of protocols for Ubiquitous wireless sensor network," in *6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, St. Petersburg, Russia, Oct. 2014, pp. 334-337.
- [51] A. J. D. Rathnayaka and V. M. Potdar, "Wireless sensor network transport protocol: A critical review," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 36, no. 1, pp. 134-146, Jan. 2013.
- [52] Z. Rosberg, R. P. Liu, A. Y. Dong, L. D. Tuan and S. Jha, "ARQ with Implicit and Explicit ACKs in Wireless Sensor Networks," in *IEEE GLOBECOM 2008 - 2008 IEEE Global Telecommunications Conference*, New Orleans, LO, USA, Nov. 2008, pp. 1-6.
- [53] M. A. Mahmood, W. K. G. Seah, and I. Welch, "Reliability in wireless sensor networks: A survey and challenges ahead," *Computer Networks*, vol. 79, no. 14, pp. 166-187, Mar. 2015.
- [54] F. Stann and J. Heidemann, "RMST: reliable data transport in sensor networks," in *First IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications, 2003.*, Anchorage, AK, USA, 2003, pp. 102-112.
- [55] A. A. Kumar S., K. Ovsthus and L. M. Kristensen., "An Industrial Perspective on Wireless Sensor Networks — A Survey of Requirements, Protocols, and Challenges," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1391-1412, Third Quarter 2014 .
- [56] *MQTT Version 3.1.1*, OASIS, 2014. [Online]. Available: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html>
- [57] A. Stanford-Clark, H. "Linh MQTT for sensor networks (MQTT-SN) protocol specification," IBM, Nov. 2013.
- [58] W. Yang, Z. Fan, and F. Wu, "Design of wireless sensor network based on 6LoWPAN and MQTT," *Guofang Keji Daxue Xuebao/ Journal of National University of Defense Technology*, vol. 41, no. 1, pp. 161-168, Jan. 2019.
- [59] C. Shanti and A. Sahoo, "Energy Efficient and Reliable Transmission of Data in Wireless Sensor Networks," in *48th Annual Convention of Computer Society of India*, 2014, pp. 341-350.
- [60] M. Y. Aalsalem, W. Z. Khan, W. Gharibi, M. K. Khan, and Q. Arshad, "Wireless Sensor Networks in oil and gas industry: Recent advances, taxonomy, requirements, and open challenges," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 113, pp. 87-97, Jul. 2018.
- [61] M. Torres-Ruiz, M. D. Lytras, and H. Mathkour, "Innovative services and applications of wireless sensor networks: Research challenges and opportunities," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 14, no. 5, May 2018.
- [62] D. Rahbari and M. Nickray, "Low-latency and energy-efficient scheduling in fog-based IoT applications," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 27, no. 2, pp. 1406-1427, Mar. 2019.
- [63] R. K. Dwivedi and R. Kumar, "Sensor Cloud: Integrating Wireless Sensor Networks with Cloud Computing," in *5th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, Gorakhpur, India, Nov. 2018, pp. 1-6.
- [64] B.-S. Kim, K.-I. Kim, B. Shah, F. Chow, and K. Kim, "Wireless Sensor Networks for Big Data Systems," *Sensors*, vol. 19, no. 7, pp. 1565, Apr. 2019.