

Aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) para la conservación y gestión eficiente de la energía

Guillermo Friedrich

Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional Bahía Blanca

Bahía Blanca, Argentina

gfried@frbb.utn.edu.ar

Guillermo Reggiani

Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional Bahía Blanca

Bahía Blanca, Argentina

ghreggiani@frbb.utn.edu.ar

Resumen— El presente trabajo reúne los conceptos y propuestas iniciales, sobre los que se ha ido trabajando en el marco del Proyecto de I+D “Aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) para la conservación y gestión eficiente de la energía”. En base a los mismos se han desarrollado y ensayado algunas implementaciones a nivel de prototipo y se han elaborado algunos trabajos presentados en una jornada internacional [1], un trabajo en un congreso nacional [2] y una publicación en revista indexada internacional [3]. Asimismo, se encuentra en desarrollo una implementación experimental de MQTT sobre RS485, usando la red eléctrica como medio de transmisión mediante interfaces adecuadas, que es la base de una próxima publicación.

Palabras clave: IoT, RS485, MQTT, Power Line Communication.

I. INTRODUCCIÓN

Internet de las Cosas (IoT: Internet of Things) es un paradigma que ha venido teniendo un gran despliegue en diversas áreas, desde el ámbito doméstico hasta la industria y la salud, entre otras. El paradigma IoT resulta de interés porque facilita el diseño e implantación de aplicaciones que conectan dispositivos y objetos de uso cotidiano, haciendo posible su identificación y comunicación, con fines de monitoreo y/o control.

En los últimos años ha habido un creciente desarrollo de aplicaciones orientadas a la conservación de la energía, basadas en IoT y

computación en la nube (CC: cloud computing). Algunas de esas propuestas se orientan a la automatización de la gestión de energía, de acuerdo con modelos que intentan reducir consumos de energía y al mismo tiempo brindar bienestar a los habitantes de los denominados edificios inteligentes [4] y casas inteligentes [5]. Mientras tanto, otras propuestas se orientan a brindar realimentación a los usuarios acerca de sus consumos, a fin de que puedan administrarlos racionalmente. Hacia este último enfoque se orienta el presente trabajo.

Las facturas periódicas por los consumos de electricidad y gas también representan una forma de realimentación, pero no son tan efectivas para causar cambios en los patrones de consumo. Una adecuada realimentación puede ayudar a reducir los consumos entre un 5% y un 20% [6] si se siguen las siguientes premisas: entregada regularmente, con información presentada de manera clara y atractiva, preferentemente con detalle de consumo por artefacto, asociada con algunas metas de conservación de energía.

Los dispositivos IoT por lo general tienen una pequeña capacidad de procesamiento. CC tiene una capacidad ilimitada virtual de almacenamiento y procesamiento. La conjunción de IoT y CC permite el desarrollo de soluciones complejas, con facilidad de acceso para los usuarios mediante interfaces web y/o aplicaciones móviles. Las principales empresas que ofrecen servicios en la nube, tales como Amazon, Google y Microsoft, están orientadas

al mundo de IoT [7]; también Mathworks, que permite combinar sus herramientas analíticas con IoT.

Uno de los protocolos de comunicación ampliamente utilizado en el campo de IoT es Message Queue Telemetry Transport (MQTT) [8]. MQTT es un protocolo de la capa de aplicación, basado en un paradigma conocido como publicador-subscriptor, que permite que los clientes puedan enviar publicaciones de determinados tópicos hacia un broker, como también suscribirse a determinados tópicos, para recibir actualizaciones de los mismos cada vez que se produzcan. El protocolo de transporte habitualmente utilizado por debajo de MQTT es TCP. Por otra parte, los protocolos y tecnologías habitualmente utilizados en las capas inferiores de IoT son inalámbricos: WiFi, IEEE 802.15.4, Bluetooth; también cabe mencionar a LTE y LTE-A en el caso de las redes de telefonía celular [9].

Teniendo en cuenta que por lo general los dispositivos IoT tienen limitada capacidad de memoria y procesamiento, y es conveniente que tengan un reducido consumo de energía, este trabajo está orientado a tratar de aprovechar un estándar clásico de las comunicaciones por cable, como es RS485, para permitir la conexión de dispositivos sencillos a una red basada en MQTT. De esta manera el dispositivo IoT podría estar basado en un microcontrolador de baja gama, requiriendo sólo disponer de una interfaz serial asincrónica (UART) para la comunicación.

RS485 brinda un medio de comunicación semi dúplex, de baja velocidad y multipunto. Conecta múltiples nodos en cascada, típicamente sobre un par trenzado, usando señalización diferencial y alcanzando distancias de hasta 1 km. Las tasas de transmisión típicas están entre 9.6 kbps y 115.2 kbps.

Asimismo, una posibilidad adicional que se plantea, para evitar la necesidad de realizar un tendido de cable adicional, es utilizar interfaces adecuadas para transmitir RS485 sobre la red eléctrica. En este sentido se analiza una posible interfaz basada en el circuito integrado THVD8010 [10].

Dos trabajos relacionados en esta temática son el [11] y el [12]. El primero presenta una adaptación de 6LoWPAN para usar RS485 como capa física, a fin de posibilitar la conexión

de dispositivos de baja capacidad a una red IPv6, usando un esquema de tipo CSMA para acceder al medio compartido, de manera análoga a como lo haría IEEE 802.15.4 para acceder al medio inalámbrico. El segundo presenta una implementación de IP sobre RS485, que utiliza un esquema maestro/esclavo para regular el acceso al medio, bajo el control de un nodo (denominado IP Router). Cada nodo conectado a RS485 tiene una dirección IP y un identificador de nodo (que hace las veces de dirección MAC), por lo que el IP Router debe tener ambas asociadas para poder enviar paquetes hacia un determinado nodo del segmento RS485.

La propuesta actual tiene semejanzas con los trabajos anteriores, en particular con el segundo, en cuanto al esquema maestro/esclavo para controlar el acceso a la red RS485. Pero una diferencia significativa, que lo hace más sencillo y adecuado para dispositivos simples, es que no requiere de usar direcciones IP sobre RS485, sino que los mensajes se identifican por los tópicos MQTT. Esto implica menores tamaños de trama y menor requerimiento de procesamiento, tanto en los nodos RS485 como en el gateway que los vincula con el resto de la red.

A. *El protocolo MQTT*

A diferencia del modelo de la mayoría de los protocolos usados en Internet, basados en el paradigma cliente-servidor, el protocolo MQTT está basado en un paradigma Publicador-Suscriptor. El mismo posibilita que clientes interesados en determinados tópicos de información se suscriban a los mismos en un servidor denominado bróker. Asimismo, los clientes pueden publicar determinados tópicos y luego el bróker los reenvía a los suscriptores correspondientes. En la Fig. 1 se presenta un resumen del modelo operativo de MQTT, en la que se observan los distintos tipos de mensajes, como también que es posible que un nodo sea al mismo tiempo publicador y suscriptor

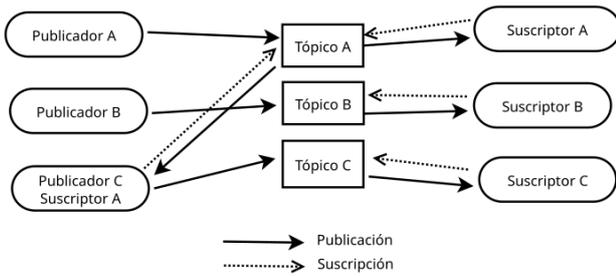


Fig. 1. Esquema básico del modelo publicador-suscriptor de MQTT

Cabe señalar que el protocolo MQTT tiene previstos tres tipos de servicio: QoS 0, QoS 1 y QoS 2. En QoS 0 cada publicación se recibe a lo sumo una vez; en QoS 1 cada publicación se recibe al menos una vez y en QoS 2 cada publicación se recibe exactamente una vez.

La presente propuesta contempla la posibilidad de operar con QoS 0 o QoS 1.

II. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA PROPUESTO

El objetivo del sistema propuesto es la implementación de una red de dispositivos basada en el uso del protocolo MQTT, usando RS485 en la capa física, para posibilitar la integración de dispositivos de bajos recursos. En la Fig. 2 se presenta un esquema general de la red, donde se distinguen los dos elementos principales: los nodos RS485 y el gateway MQTT-RS485, cuyas funciones se describen seguidamente.

El gateway actúa hacia el broker MQTT como representante de los nodos RS485 que tiene bajo su control. Para ello debe tener una interfaz adecuada para conectarse a una red TCP/IP, que típicamente podrá ser Ethernet o WiFi. Por otra parte, debe tener una interfaz UART para conectar hacia la red RS485. Un criterio que se estableció para el gateway es que debe ser lo más simple y económico posible, en términos de memoria y procesamiento.

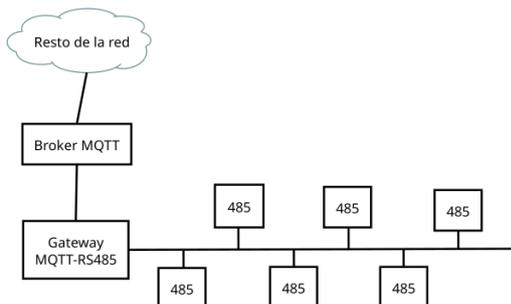


Fig. 2. Diagrama general de la red MQTT-RS485

Esto incluye no llevar un registro de las suscripciones efectuadas por cada nodo RS485.

Los nodos RS485 pueden enviar mensajes de suscripción a determinados tópicos y/o enviar publicaciones de distintos tópicos. Cuando el gateway recibe un pedido de suscripción de un nodo RS485 lo reenvía al broker, siendo el gateway el host que queda referenciado en el broker como suscriptor. Luego, cuando el gateway recibe una publicación desde el broker, la reenvía en broadcast a todos los nodos RS485, para que los interesados la acepten y procesen, y el resto las descarte. En cuanto a las publicaciones enviadas por los nodos RS485, el gateway simplemente las reenvía al broker.

Las comunicaciones en el segmento RS485 se realizan mediante un esquema maestro/esclavo bajo el control del gateway. Los nodos no tienen una dirección IP individual, sino que la dirección IP de todo el conjunto es la del gateway. Los nodos se identifican mediante un identificador de 6 bits, que el gateway utiliza durante el proceso de polling y para el envío de mensajes hacia los mismos.

A. Pila de Protocolos

La pila de protocolos que implementan los nodos RS485 está compuesta de tres capas, como se observa en la Fig. 3.

Dentro de la capa MAC cabe analizar dos elementos: el formato de trama MQTT485 y el mecanismo de polling, los que se tratan en la siguiente sección.

También resulta de interés observar las pilas de protocolos en el conjunto formado por los tres tipos de nodo, según se observa en la Fig. 4. En la misma se observa la función de reenvío que realiza el gateway. Más adelante se analiza el subconjunto de mensajes del protocolo MQTT procesados por los nodos RS485 y el gateway.

Aplicación	MQTT
MAC	Polling (trama MQTT485)
Física	RS485

Fig. 3. Pila de protocolos en los nodos RS485

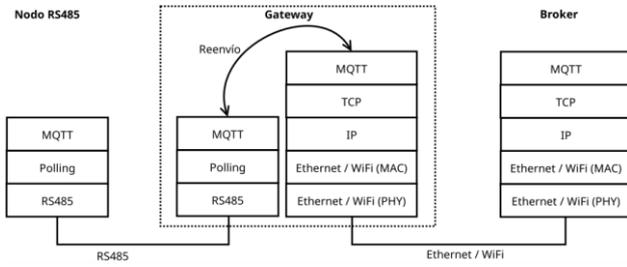


Fig. 4. Modelo de capas en la ruta entre nodo y bróker

B. Capa Física

La capa física de RS485 consiste en un bus de par trenzado al que se conectan los distintos nodos. La transmisión se efectúa en modo diferencial. Sólo un nodo a la vez puede transmitir; los transmisores deben estar por defecto en el estado de alta impedancia, del que salen solamente durante el intervalo de transmisión. El mecanismo de control de acceso al medio típico es del tipo maestro/esclavo. En el caso del sistema propuesto, el gateway será el maestro de la red RS485.

Como fue mencionado previamente, una variante de interés, que puede representar una ventaja significativa, es la conexión para transmisión de RS485 a través de la red eléctrica, mediante interfaces adecuadas. En tal sentido se evalúa la posibilidad de utilizar interfaces basadas en el transceiver THVD8000 [10] o THVD8010 [13], cuya implementación podría ser como la que se observa en la Fig. 5.

Tanto los nodos como el gateway se conectan a través de una UART y mediante los transceivers se conectan a la red eléctrica, evitando tener que disponer un cableado adicional para las comunicaciones mediante RS485.

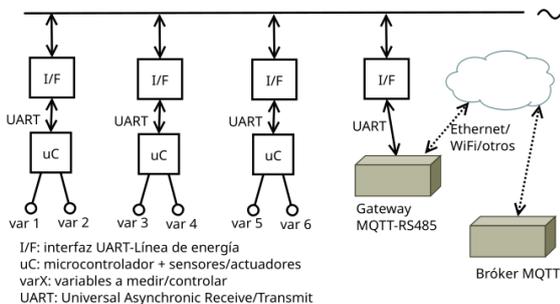


Fig. 5. Implementación de MQTT-RS485 sobre la red eléctrica

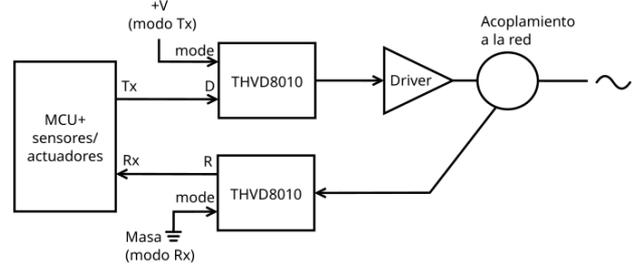


Fig. 6. Diagrama en bloques de la interfaz RS485 a la red eléctrica

En la Fig. 6 se presenta el diagrama en bloques de un posible circuito de interfaz entre la UART del microcontrolador y la red eléctrica, en el que se observan los capacitores de desacople y la resistencia de terminación, cuyos valores se calcularon a partir de las frecuencias de red y portadora. Del lado del microcontrolador, además de las señales TxD y RxD hay una señal de control para establecer el sentido de transmisión del transceiver, teniendo en cuenta que la modalidad de trabajo es semidúplex.

La velocidad de transmisión máxima que se puede utilizar depende de la frecuencia de la portadora, que se selecciona mediante el valor de una resistencia. Para una frecuencia de 125 kHz, la tasa de transmisión puede ser de 9600 bps, mientras que para 300 kHz se puede transmitir hasta 19200 bps.

C. Formato de Trama en RS485

El formato de trama utilizado en el segmento RS485 es tal como se presenta en la Fig. 7. En la misma se observa también el detalle de los distintos campos:

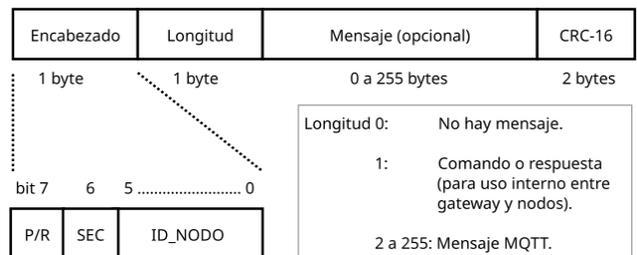


Fig. 7. Formato de trama RS485

Encabezado:

P/R (poll / respuesta): cuando el mensaje es enviado por el gateway, este bit va en uno; cuando el mensaje es una respuesta enviada por un nodo va en cero.

SEC: este bit se utiliza a modo de un número de secuencia de las tramas, alternando su valor entre uno y cero. En las tramas de respuesta, este bit va con el mismo valor que el enviado por el gateway.

ID_NODO: identificador del nodo. Cuando transmite el gateway indica el nodo interrogado o destinatario. Cuando transmite un nodo, contiene el identificador del mismo. El valor cero se utiliza para envíos en broadcast desde el gateway hacia todos los nodos. Los valores entre 1 y 63 identifican a nodos individuales.

D. Tipos de Trama

Los distintos tipos de trama utilizados en el segmento RS485 son:

Con longitud cero byte:

POLL: enviada por el gateway para habilitar a un nodo específico a transmitir.

ACK: enviada por el nodo encuestado cuando no tiene ninguna suscripción o publicación para transmitir.

Con longitud 1 byte:

INI: mensaje enviado por el gateway a cada nodo, luego de su inicio o reinicio, para solicitarle a los nodos que envíen (o reenvíen) sus suscripciones.

COM: enviada por el gateway hacia un determinado nodo, con algún comando para que el destinatario realice alguna acción de configuración o para consultar por algún estado interno. Por el momento sólo está definido el mensaje 0x01 (INICIO), el resto de los valores están reservados para futuras funciones de configuración y/o testeo.

RESP: enviada por un nodo, ante un eventual comando recibido. Por el momento no hay

mensajes definidos, sino que están reservados para su uso futuro.

Con longitud mayor o igual a dos bytes:

PUB: puede ser enviada por un nodo, cuando tiene que publicar el valor de un determinado tópico hacia el gateway, para que éste lo reenvíe al broker, como también puede ser emitida por el gateway para reenviar una publicación recibida del broker hacia los nodos RS485.

SUB: enviada por un nodo hacia el gateway, para que este se suscriba a un cierto tópico en el broker.

En la Tabla 1 se presenta el repertorio de mensajes y los valores de los distintos campos de la trama. Cabe señalar que en dicha Tabla no se menciona al campo SEC, debido a que su valor alterna entre 0 y 1, al ser utilizado para implementar un esquema de acuse de recibo implícito para ciertos tipos de tramas.

E. Mecanismo de Polling y Acuse de Recibo

La transmisión de datos en el segmento RS485 se maneja mediante un esquema de polling controlado por el gateway. Este realiza una rueda cíclica enviando una trama POLL a cada nodo.

Trama	P/R	ID_NODO	Long	Mensaje
POLL	1	unicast	0	
ACK	0	unicast	0	
INI	1	unicast	1	0x01
COM	1	unicast	1	A definir
RESP	0	unicast	1	A definir
PUB (gw)	1	broadc	2 a 255	Pub
PUB (nodo)	0	unicast	2 a 255	Pub
SUB (nodo)	0	unicast	2 a 255	Subs

TABLA I
REPERTORIO DE MENSAJES EN EL SEGMENTO RS485

El bit SEC sirve a los fines de realizar un acuse de recibo implícito. Por un lado, para que el gateway confirme la recepción de una trama INI por parte del nodo destinatario. Por otra parte, para que un nodo de por recibida una trama SUB en el gateway. En la Fig. 8 se observa un ejemplo de esta secuencia de mensajes, con la pérdida de una respuesta y el uso del bit SEC (indicado entre corchetes) como acuse de recibo implícito.

El envío de mensajes SUB por parte de los nodos siempre se realiza teniendo en cuenta el acuse de recibo implícito, independientemente de que se trabaje con QoS 0 o QoS 1, a fin de asegurar que el bróker reciba la suscripción. En cambio, las publicaciones enviadas por los nodos bajo QoS 0 podrían efectuar retransmisiones si no reciben el acuse de recibo, mientras no se les haya generado una nueva publicación para enviar. En ese caso descartarán la publicación anterior y enviarán la nueva. En cambio, con QoS 1 deberán seguir retransmitiendo hasta recibir el acuse de recibo y mantener en una cola las publicaciones que se vayan produciendo.

Las publicaciones recibidas por el gateway desde el bróker, para ser retransmitidas a los nodos RS485, también admiten dos modalidades de acuerdo con QoS. Si se opera con QoS 0, el gateway envía la publicación en broadcast hacia los nodos, sin esperar confirmación. Con QoS 1 el envío debe ser individual a cada nodo, utilizando el esquema de acuse de recibo y eventual retransmisión.

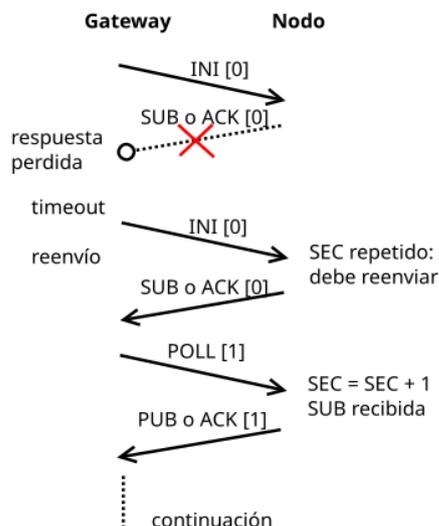


Fig. 8. Ejemplo del mecanismo de polling y acuse de recibo

Cabe observar que en el caso de operar con QoS 1, el gateway debe llevar un registro de las suscripciones de cada nodo, a fin de reenviar publicaciones sólo a los nodos suscriptos. Con QoS 0 esto no es necesario, debido a que el envío de publicaciones a los nodos es en broadcast sin acuse de recibo.

En caso de operar con QoS 0, la diferencia se presenta con las publicaciones, que no necesitan acuse de recibo. Por lo tanto, si un nodo envió PUB [n] y luego sigue recibiendo POLL [n], podría reenviarlo mientras no tenga una nueva publicación o suscripción para enviar. En tal caso descartará el que estaba reenviando y pasará a enviar el nuevo mensaje.

III. PRÓXIMOS PASOS

Continuando con los ensayos realizados y presentados en [2] y [3], las próximas actividades previstas son:

Desarrollo y ensayo de un transceiver de línea para mejorar la performance (distancia, tasa de bits y tasa de error) del THVD8000 sobre instalaciones eléctricas.

Desarrollo y ensayo de una implementación de MQTT sobre RS485, utilizando un gateway RS485-TCP/IP como nexo con el bróker MQTT. Primero utilizando RS485 convencional sobre par trenzado y luego sobre la instalación eléctrica.

REFERENCIAS

- [1] G. Friedrich and G. Reggiani, "An approach to residential energy savings using IoT and Cloud Computing to provide real-time feedback," Short Papers of the 9th Conference on Cloud Computing Conference, Big Data & Emerging Topics. Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Informática, 2021, 2-5. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/121564>. DOI:10.35537/10915/121564.
- [2] G. Friedrich and G. Reggiani, "Comunicación de datos para dispositivos IoT de bajos recursos: RS485 sobre la red eléctrica," Congreso Argentino de Sistemas Embebidos (CASE 2022), Universidad Nacional de la Plata, La Plata, Buenos Aires, Argentina, 18 al 19 de agosto de 2022. <http://www.sase.com.ar/case/ediciones/case-2022/>.
- [3] G. Friedrich and G. Reggiani, "Data Communication for Low Resources IoT Devices: RS485 over Electrical Wires," in IEEE Embedded Systems Letters, doi: 10.1109/LES.2023.3250162.
- [4] E. Taktak and I. Bouassida Rodriguez, "Energy consumption adaptation approach for Smart Buildings". 2017 IEEE/ACS 14th International Conference on Computer Systems and Applications, Hammamet, Tunisia, October 30 - Nov. 3, 2017, pp. 1670-1377.
- [5] A.R. Al-Ali, I.A. Zualkernan, M. Rashid, R. Gupta and M. Alikarar, "A smart home energy management system using IoT and big data analytics approach", 2017 IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 63, no. 4, pp. 426-434.

- [6] D. Vine, L. Buys and P. Morris. "The Effectiveness of Energy Feedback for Conservation and Peak Demand: A Literature Review", *Open Journal of Energy Efficiency (OJEE)*, 2013, 2, pp. 7-15.
- [7] P. Pierleoni, R. Concetti, A. Belli and L. Palma, "Amazon, Google and Microsoft Solutions for IoT: Architectures and a Performance Comparison". *IEEE Access*, vol. 8, 2020, pp. 5455-5470.
- [8] S. Ereno- Quincozes, E. R. Reginaldo-Tubino and J. Kazienk, "MQTT protocol: fundamentals tools and future directions", *IEEE Latin America Transactions.*, vol. 17, no. 9, pp. 1439-1448, Sep. 2019.
- [9] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications", *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, Vol. 17, No. 4, Fourth Quarter 2015.
- [10] Texas Instruments, 2020. THVD8010 RS-485 Transceiver with OOK Modulation for Power Line Communication. Web: <https://www.ti.com/lit/gpn/THVD8010>.
- [11] S. Späthe and C. Prater, "Realization of IPv6 connectivity via RS485 fieldbus by adaption of 6LoWPAN", *The 2018 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IoT&IS)*, pp. 35-39.
- [12] H. Ochiai, H. Nakagami, Y. Teranishi and H. Esaki, "Facility networking with IP over RS485: Packet control for master-slave cascaded networks," *2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, Venice, Italy, 2014, pp. 410-415, doi: 10.1109/SmartGridComm.2014.7007681.
- [13] Texas Instruments, 2021. "THVD8000 RS-485 Transceiver with OOK Modulation for Power Line Communication datasheet (Rev. A)", marzo 2021, <https://www.ti.com/product/THVD8000>.