

# Depuración de Aguas Residuales en la Industria 4.0

Jesús M. Gómez-de-Gabriel, Ana M. Jiménez Arévalo,  
Laura Eiroa Mateo, y Javier Fernández-de-Cañete-Rodríguez

Dto. de Ingeniería de Sistemas y Automática  
Escuela de Ingenierías Industriales - Universidad de Málaga  
[jesus.gomez@uma.es](mailto:jesus.gomez@uma.es)

## Resumen

*Este artículo presenta un sistema de automatización de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) mediante tecnologías de Industria 4.0. Se ha implementado un sistema Internet of Things (IoT) para la obtención de los datos de los sensores y envío de consignas a los actuadores. El sistema posee un sistema de control local que, junto con el resto de los componentes, se modelan como un sistema ciberfísico (CPS). Se ha implementado sobre una planta experimental, se ha creado una base de datos con la información histórica de los datos de los sensores y se están creando funciones para analizar la información e identificar el modelo de la planta.*

**Palabras clave:** EDAR, estación depuradora de aguas residuales, IoT, CPS, Industria 4.0.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales generadas por la actividad humana son actualmente un serio problema y uno de los focos de contaminación más importantes para nuestros cauces y acuíferos. Los cada vez mayores volúmenes de aguas residuales con elevadas cargas contaminantes que nuestra sociedad produce hacen necesario un tratamiento más extendido e intensivo de las aguas residuales.

Las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) comprende un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos con el objetivo de obtener un agua efluente de mayor calidad en base a ciertos parámetros normalizados, siendo el proceso de lodos activos una de las tecnologías más utilizadas para este propósito y se emplean generalmente para la eliminación de contaminantes orgánicos en aguas residuales [7].

Los sistemas ciberfísicos (CPS) son integraciones de procesos físicos y de cálculo. Los sistemas de computación y sus redes integradas monitorizan y controlan los procesos físicos, generalmente con bucles de retroalimentación donde los procesos físicos afectan a la computación y viceversa. El diseño de tales sistemas, por lo tanto, requiere



Figura 1: Planta experimental de tratamiento de aguas residuales.

entender la dinámica conjunta de computadores, software, redes y procesos físicos [5].

La aplicación de IoT en la industria tiene su fundamento en la interconexión de todos los dispositivos involucrados en la producción, de forma que puedan enviarse grandes volúmenes de información del proceso en tiempo real, a través de Internet, siendo éstos captados por redes de sensores y configurando así, sistemas con aprendizaje automático o sistemas inteligentes. Gracias a la interconectividad de sensores a través de Internet es posible realizar un control eficaz del proceso industrial a distancia, lo que permite una mayor flexibilidad y optimización de tiempo y costes, utilizándose grandes volúmenes de datos gracias a los conceptos de *cloud storage* y *cloud computing* [3]. De hecho en [11] se plantea el uso de IoT como tecnología que hace posible una optimización de la recuperación de energía del agua de desecho de edificios residenciales, y en [4] se describe el diseño de un sistema de automatización de bajo coste de una EDAR utilizando una red de sensores Zigbee (IEEE STD 802.15.4).

El trabajo presentado describe la aplicación de IoT a una planta experimental EDAR (Véase Figura 1 y su conexión mediante protocolos de conexión a un servidor que almacena los datos históricos de operación. Se han creado unos sistemas ciberfísicos que permiten interactuar desde la red con cualquier componente de planta a diferentes

niveles. Asimismo se hace una revisión de las tecnologías que forman parte de la cuarta revolución industrial (industria 4.0), presentada en [8] que nos permitan la adquisición y almacenamiento de datos de la planta en tiempo real para su posterior análisis.

Este documento se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se introducen las tecnologías que forman parte de la Industria 4.0 que se han aplicado. En la sección 3 se describen la planta experimental objeto del estudio y su sistema de sensores así como el desarrollo del sistema de monitorización y control a través de IoT. Posteriormente, en la sección 4 se describen los experimentos realizados y se discuten los resultados obtenidos. Finalmente, en la sección 5 se incluyen conclusiones y se plantean trabajos futuros a realizar.

## 2. TECNOLOGÍAS EN LA INDUSTRIA 4.0

### 2.1. Internet de las Cosas

El *Internet de las Cosas* (IoT) consiste en la conexión a Internet de muchos millones de dispositivos, que recogen información del mundo real remotamente, y que puede ser compartida con otros sistemas y dispositivos. IoT se basa fundamentalmente en dispositivos (sensores, actuadores y controladores embebidos) identificados y conectados a Internet.

Gartner, Inc [1] prevé que en 2016 se estarán usando más de 6.400 millones de cosas conectadas, un 30 % más que en 2015, y que alcanzarán los 20.800 millones en 2020. En 2016, cada día se conectan 5.5 millones de nuevas cosas. El gasto esperado será de \$235.000 millones en 2016, un 22 % más que en 2015, en contratos de instalación y mantenimiento, pero sobre todo en servicios de conectividad.

Sus aplicaciones industriales IoT abarcan prácticamente todos los sectores, entre ellos la industria de automoción, servicios y productos, gestión ambiental, *smart cities*, etc.

### 2.2. Industria 4.0

Industria 4.0 o cuarta revolución industrial [10] pretende permitir una mayor adaptabilidad a los procesos de producción recogiendo datos a través de las máquinas y haciendo así más eficiente el uso de los recursos y por tanto dando paso a procesos más rápidos, más eficientes y con mayor flexibilidad, todo ello con un costo más reducido. Gracias a internet, se está haciendo posible la conexión entre máquinas y humanos en sistemas ciberfísicos a

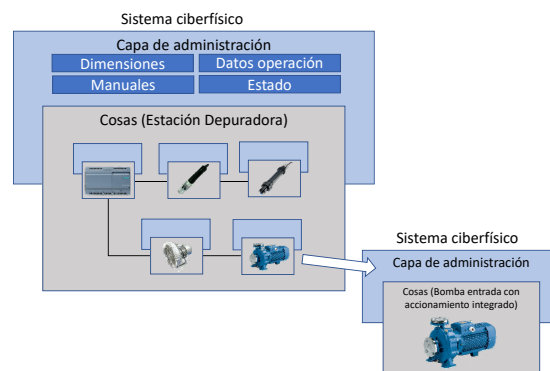


Figura 2: Esquema general de un CPS donde se muestra su capa de administración y su distribución jerárquica.

través de las redes.

### 2.3. Sistemas ciberfísicos

Los sistemas ciberfísicos (CPS) son sistemas híbridos compuestos por una parte física (que conecta con el mundo real a través de sensores y actuadores), y una parte virtual o de la información. Están compuestos por componentes (software, sensores, actuadores, sistemas de control embebido, ...) que colaboran para conseguir un comportamiento global. A diferencia del IoT, los CPS se basan en la relación entre computación y el mundo físico, en lugar de considerar el dispositivo físico.

Podemos considerar un componente físico combinado con su representación virtual digital como un ejemplo de un sencillo sistema ciberfísico (CPS) o el tipo de “componente de Industria 4.0” más simple. La representación virtual digital de ese componente puede contener tanto información general del tipo de dispositivo como información y servicios del componente concreto.

A los CPS se accede a través de su capa de administración, tanto de manera directa como indirecta si estos son componentes a su vez de otros CPS. En la figura 2 se muestra un esquema que muestra esta jerarquía. Los CPS pueden incluir componentes de diferentes fabricantes o proveedores, y formar parte de otros.

La construcción de un CPS plantea nuevos problemas, ya que se basan en diferentes tecnologías emergentes y engloba diferentes áreas de conocimiento y dominios técnicos, que requieren de nuevas disciplinas de ingeniería de sistemas: monitorización y control; sistemas complejos y de gran escala; sistemas tolerantes a fallos; interacción con el usuario; optimización; adaptación, gestión de cambios y resiliencia; control en tiempo real; sistemas distribuidos y sistemas de sistemas.

Existen plataformas de desarrollo y lenguajes de modelado para el desarrollo de CPS mediante diseño basado en modelos (MBD). Se han construido diversos lenguajes de modelado de dominio específico (DSL) que permiten desarrollar CPS a partir de modelos gráficos, para supervisión de redes de suministro eléctrico.

## 2.4. Big data

El uso de IoT [14] produce una enorme cantidad de datos. Esos datos pueden ser procesados para extraer patrones, utilizables por otras aplicaciones y servicios como sistemas de salud, sistemas públicos de información, gestión de ciudades, eficiencia energética, gestión de residuos, gestión del agua. Estos servicios necesitan procesar la información en un servidor local o en la nube (*cloud computing*). Se crean así nuevos servicios como *smart cities*, *smart mobility*, *smart economy*, etc.

## 2.5. Controlando a través de IoT

En los sistemas de control convencionales, se asume que las redes de comunicaciones son deterministas y fiables. Los sistemas de tiempo real se basan en planificación estática de los tiempos de cómputo y comunicaciones [13]. Ahora algunos sistemas de control se efectúan a través de Internet, aunque a nivel supervisor en sistemas de distribución eléctrica o depuradoras de agua, y otros. La automatización en bucle cerrado, en muchos casos requiere de un controlador in-situ dedicado. Cerrar el bucle en IoT requiere resolver una serie de problemas que no se encuentran normalmente: control en redes no deterministas; retardo y *jitter*; ancho de banda; seguridad; interoperabilidad entre sensores y algoritmos.

Entre los avances que se espera que hagan posible cerrar el bucle de control en IoT se encuentran las comunicaciones celulares 5G, redes inalámbricas de baja latencia (*Tactile Internet*) [6] y las redes intermedias próximas a los sensores y actuadores (*Fog Computing*).

## 2.6. Seguridad

En las aplicaciones industriales, la seguridad es un factor muy importante. En [12] se plantea el problema de la seguridad en una red IoT superpoblada de dispositivos. Estudia la seguridad de diversos sistemas (SCADA, sistemas de control de tráfico, cámaras web, impresoras, etc.) y los ratios de vulnerabilidad van desde un 0.44% hasta un 40%.

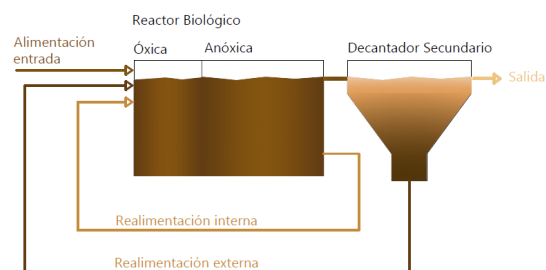


Figura 3: Esquema general de una depuradora de tipo nitrificación - desnitrificación.

## 3. PLANTA EXPERIMENTAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Las plantas de depuración de aguas residuales de tipo nitrificación-desnitrificación (NDN), tienen como función la eliminación del nitrógeno del agua residual mediante un proceso micro-biológico de oxidación del amonio mediante bacterias. El nitrato es reducido por bacterias a gas nitrógeno molecular, que es un componente de la atmósfera. El reactor biológico está formado por una zona anóxica y una zona aerobia respondiendo al modelo de depuración de nitrificación - desnitrificación representado en el esquema 3. En la cámara óxica se produce la nitrificación en el que el amoníaco es oxidado a nitritos y nitratos. En la zona anóxica se produce la desnitrificación, esto es, los nitratos y los nitritos son utilizados por bacterias heterótrofas como aceptores de electrones produciendo nitrógeno gas y un consumo de carbono orgánico biodegradable. El proceso se muestra en el esquema de la Figura 3

En esta trabajo se ha empleado un reactor biológico de lodos activos experimental, formada por el tanque de alimentación, el reactor biológico, un decantador secundario y un tanque de salida de agua clarificada mostrada en la figura 1.

El tanque de alimentación de entrada tiene una capacidad de 300 litros de agua sintética elaborada y dispone de los sensores necesarios para la medida de parámetros del agua residual. Los parámetros medidos en el tanque de entrada son:

- Concentración de materia orgánica.
- Concentración de nitrato.
- Concentración de amonio.
- PH
- Turbidez

En el interior del tanque de alimentación hay un agitador para evitar decantaciones en el mismo. Por otro lado, se dispone de bomba de alimentación de entrada para impulsar el agua sintética a cabecera del reactor biológico controlada mediante un controlador PID.

El reactor biológico está formado por una zona anóxica y una zona aerobia respondiendo al modelo de depuración NDN mostrado en la Figura 3.

Tanto en la zona anóxica como en la zona aerobia se instalan sensores de medida de oxígeno disuelto y sensores REDOX. Contiene un agitador en cada zona para evitar decantaciones en el reactor biológico. Para mantener el nivel de oxígeno disuelto en la zona aerobia se instala bomba soplante mediante difusores controlado por un controlador PID desde el PLC.

En el decantador secundario tiene lugar la precipitación de los flocúlos generados en el reactor. En esta zona se instalan sensores para la medida de concentración de materia orgánica, concentración de nitrato y amonio y turbidez. El agua clarificada en la parte superior del decantador es conducida mediante gravedad hacia el tanque de salida.

Esta planta contiene una recirculación interna desde zona aerobia hacia cabecera del reactor biológico (zona óxica) para completar el proceso de nitrificación - desnitrificación. Por otro lado, dispone de realimentación externa para recircular fangos desde decantador secundario hacia reactor biológico. Ambas recirculaciones son controladas mediante un bucle de control PID implementado en el PLC.

### 3.1. Implementación de IoT

Para la obtención de las señales del proceso de EDAR y supervisión mediante IoT, ha sido necesario realizar una comunicación de intercambio de señales entre el PLC y el PC usando el protocolo de comunicaciones *Modbus* TCP/IP.

En [15] se plantea el uso de este protocolo basado en publicadores y suscriptores, para obtener información de diferentes elementos e incluso realizar procesos de control, empleando un broker o servidor local o remoto para controlar el intercambio de información. En este caso, se implementa el protocolo MQTT para realizar la conexión de las variables del PC con un servidor IoT público que permite el acceso remoto a modo de demostración.

Se han conectado las siguientes señales del proceso a modo de supervisión desde servidor remoto:

- Nivel de amonio tanque de alimentación

EDAR.

- Nivel de nitrato tanque de alimentación EDAR.
- Concentración de materia orgánica en tanque de alimentación.
- Nivel de amonio en decantador secundario.
- Nivel de nitrato en decantador secundario.
- Concentración de materia orgánica en decantador secundario.
- Oxígeno disuelto en cámara óxica del reactor biológico.

Por otro lado, desde un servidor remoto se controla la orden de marcha/paro del agitador de la zona óxica del reactor biológico. Además, se regula el régimen de funcionamiento y la orden de marcha/paro de la bomba de alimentación de entrada.

Desde el sistema de control del PLC se han modificado las librerías de motor, incorporando un modo de operación de equipos a nivel remoto. Una vez seleccionado el modo de control remoto externo IoT, queda anulado el control local desde HMI o desde SCADA.

Posteriormente, se deseaba emplear una base de datos para almacenar los históricos del sistema. Basándonos en el lenguaje SQL, se decidió emplear la base de datos *SQLite* que tal y como se describe en [9] permite crear tablas organizadas en su interior y cuenta con un gran tamaño de almacenamiento.

Con la base de datos seleccionada, se ha empleado el broker local *Mosquitto* [2] de MQTT para almacenar los históricos en la base de datos *SQLite*. Inicialmente se extraen los valores de las variables por medio del protocolo *Modbus* TCP/IP haciendo uso de un script de *Python* con el que se publicarán los valores obtenidos en el servidor local de *Mosquitto*, tal como se muestran en la Figura 4.

De manera independiente, se crea la base de datos mediante otro script de *Python* pudiendo indicar el nombre, tipo y número de variables a almacenar. Finalmente, se creará un último script a modo de suscriptor encargado de almacenar los datos publicados en el servidor IoT en la base de datos. Este sistema cuenta con la ventaja de permitir crear y rellenar la base de datos desde un PC independiente al conectado al PLC de la planta.

Se han almacenado los siguientes históricos en la base de datos:

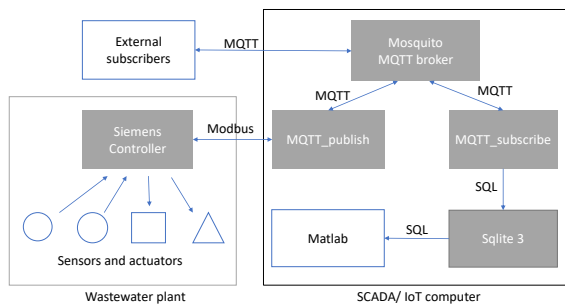


Figura 4: Esquema de la conexión de la planta de depuración de aguas residuales con su controlador existente a una red IoT mediante un servidor local que almacena la historia de las lecturas en una base de datos

- Nivel de amonio tanque de alimentación EDAR.
- Nivel de nitrato tanque de alimentación EDAR.
- Concentración de materia orgánica en tanque de alimentación.
- Temperatura tanque de alimentación EDAR.
- Nivel pH tanque de alimentación EDAR.
- Nivel de turbidez taque alimentación EDAR.
- Caudal bomba alimentación de entrada.
- Oxígeno disuelto en cámara anóxica del reactor biológico.
- Redox en cámara anóxica del reactor biológico.
- Oxígeno disuelto en cámara óxica del reactor biológico.
- Redox en cámara óxica del reactor biológico.
- Caudal bomba de recirculación interna de la cámara óxica a la cámara anóxica.
- Nivel de amonio en decantador secundario.
- Nivel de nitrato en decantador secundario.
- Concentración de materia orgánica en decantador secundario.
- Nivel de turbidez en decantador secundario.
- Caudal bomba recirculación externa del decantador secundario a la cámara anóxica.
- Fecha de generación de históricos.
- Hora de generación de históricos.

Cabe destacar la existencia de otros servidores IoT públicos como *HiveMQ* o *Kafka* que también utilizan el protocolo MQTT, así como otras posibles bases de datos.

## 4. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Se realiza la puesta en marcha de EDAR con alimentación continua de entrada con agua residual sintética. Posteriormente, se ha adoptado la siguiente configuración de consignas de funcionamiento:

- Caudal de entrada = 8-10 l/h.
- Recirculación externa = 100 % del caudal de entrada.
- Recirculación interna = 150-200 % del caudal de entrada.
- Consigna *setpoint* oxígeno disuelto en cámara óxica = 1.5-2 mg/l.
- Agitador zona anóxica = funcionamiento en continuo.
- Agitador zona óxica = funcionamiento en continuo.
- Agitador tanque de alimentación de entrada = funcionamiento en continuo.

Durante el proceso de depuración se han obtenido resultados de rendimiento satisfactorios considerando la reducción de materia orgánica disuelta, así como reducción de turbidez a la salida y reducción del nivel de amonio a la salida.

No obstante, durante la puesta en marcha han aparecido no conformidades que se han detectado y solucionado, como la agitación ineficiente de la zona anóxica o la aparición de flóculos sobrenadantes en la superficie del decantador secundario produciendo la obturación del tubo de salida del decantador secundario.

Además se han realizado experimentos mediante la utilización de un servidor público remoto (Adafruit.IO) que permite acceso limitado desde los protocolos MQTT y REST. La supervisión de variables de proceso desde el servidor remoto IoT es fluida, permite supervisar las curvas de tendencia en tiempo real y el almacenamiento de los datos es posible exportarlo a ficheros *.csv*. Al ser un servidor remoto IoT a modo demostración tiene un límite de variables a intercambiar.

Se ha puesto en marcha el almacenamiento de históricos empleando un subscriber tanto en el

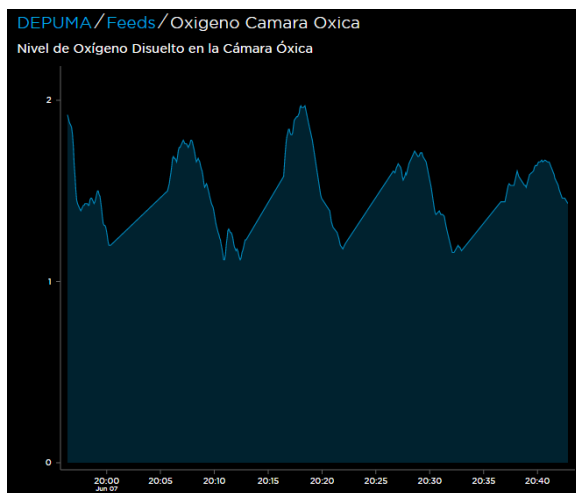


Figura 5: Curva tendencia Oxígeno Disuelto en Cámara Óxica con datos almacenados en servidor IoT de Adafruit.

propio ordenador conectado al PLC como uno independiente. En ambos casos, el almacenamiento se ha realizado de manera satisfactoria y a una velocidad elevada permitiendo adquirir nuevos datos en cuestión de segundos.

Mediante el uso del servidor local, evitamos la limitación de variables a intercambiar, permitiendo almacenar todos los elementos que intervienen en el proceso. De igual forma, las bases de datos SQLite permiten almacenar hasta un total de 2 terabytes permitiendo almacenar datos a largo plazo.

Finalmente, se han representado gráficamente los valores almacenados en la base de datos mediante el uso de un script de *Matlab* y se ha implementado un sistema que permite el arranque y reinicio automático de los servicios del sistema de información.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se comprende la necesidad de la instalación de EDAR en los núcleos urbanos e industriales para garantizar el cumplimiento de la Directiva 91/271/CEE y el Plan Nacional de Calidad de las Aguas.

Desde un punto de vista de las comunicaciones, se han conectado las variables de proceso con servidor remoto IoT para supervisión y control de la EDAR. Esto ha permitido dar un paso hacia el concepto *Industry 4.0* gracias a la interconexión digital de objetos y procesos con Internet mediante IoT.

Para futuras líneas de trabajo, la planta podrá es-

tar comunicada con otros equipos o bases de datos que permitan la identificación de cada uno de los procesos físico - químicos, a partir de los cuáles generar modelos matemáticos.

La identificación futura del proceso podrá plantear nuevos bucles de control de equipos desde servidores IoT externos que se anticipen con el fin de optimizar el rendimiento de la EDAR. Por otro lado, el almacenamiento masivo de datos en bases de datos SQL permitirá el análisis mediante algoritmos de predicción.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Proyecto Puente B.2. "Desarrollo de Técnicas de Control y Estimación Neurogenéticas para Operación Óptima de Reactores Biológicos de Lodos Activos en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales" de la Universidad de Málaga.

### Referencias

- [1] Gartner Says 6.4 Billion Connected "Things" Will Be in Use in 2016, Up 30 Percent From 2015.
- [2] A Light, R. (2017). Mosquitto: server and client implementation of the MQTT protocol. *The Journal of Open Source Software*, 2(13).
- [3] Chhatwal, A., Shukla, K., and Pathak, A. (2012). Application Development for the Internet of Things: Observations and Challenges.
- [4] Davies, R. (2015). Briefing Industry 4.0 Digitalisation for productivity and growth. Technical report, EPRS — European Parliamentary Research Service.
- [5] Derler, P., Lee, E. A., and Vincentelli, A. S. (2012). Modeling Cyber-Physical Systems. *Proceedings of the IEEE*, 100(1):13–28.
- [6] Fettweis, G. P. (2014). The Tactile Internet: Applications and Challenges. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 9(1):64–70.
- [7] Haandel, A. C. v. and Lubbe, J. G. M. v. d. (2012). *Handbook of biological wastewater treatment : design and optimisation of activated sludge systems*. IWA Pub.
- [8] Kagermann, H., Wahlster, W., and Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Technical report, National Academy of Science and Engineering.
- [9] Kreibich, J. A. (2010). *Using SQLite*. O'Reilly Media, Inc., 1st edition.
- [10] Lee, J., Bagheri, B., and Kao, H.-A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for In-

- dustry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3:18–23.
- [11] Lynggaard, P. and Skouby, K. (2016). Complex IoT Systems as Enablers for Smart Homes in a Smart City Vision. *Sensors*, 16(11):1840.
- [12] Patton, M., Gross, E., Chinn, R., Forbis, S., Walker, L., and Chen, H. (2014). Uninvited Connections: A Study of Vulnerable Devices on the Internet of Things (IoT). In *2014 IEEE Joint Intelligence and Security Informatics Conference*, pages 232–235. IEEE.
- [13] Samad, T. (2014). The Web of Things and Cyberphysical Systems: Closing the Loop. In *W3C Workshop on the Web of Things, Berlin, June 2014*, Berlin.
- [14] Skouby, K. E. and Lynggaard, P. (2014). Smart home and smart city solutions enabled by 5G, IoT, AAI and CoT services. In *2014 International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I)*, pages 874–878. IEEE.
- [15] Stanford-Clark, A. and Truong, H. L. (2013). MQTT For Sensor Networks (MQTT-SN) Protocol Specification.