

DISEÑO DE UN SISTEMA CIBER-FÍSICO PARA EL MONITOREO DEL AGUA EN EL HOGAR

Ing. José Luis Torres Gutiérrez¹, M. En I. Celina Lizeth Castañeda-Miranda¹,
Dr. Héctor A. Guerrero-Osuna (miembro IEEE)¹, Dr. Antonio del Ríos De
Santiago¹ y Dr. Luis Octavio Solís-Sánchez^{1*}

¹ Laboratorio Nacional de Sistemas Embebidos, Diseño Electrónico Avanzado y
Microsistemas, Posgrado en Ingeniería y Tecnología Aplicada, Universidad
Autónoma de Zacatecas

* Autor de correspondencia

Resumen – El agua es un recurso esencial en el hogar, ya que con este recurso se realizan diferentes actividades diarias como: ducharse, cepillarse los dientes, lavarse las manos, preparar los alimentos, lavar los trastes, lavar la ropa, entre otras. Muchas de las veces al realizar estas actividades, se consume más agua de la necesaria, provocando su desperdicio, esto se debe principalmente por que el usuario no es consciente y desconoce la cantidad de agua que utiliza, ni la cantidad de agua con la que dispone. En este artículo se presenta el diseño un sistema ciber-físico para el monitoreo de consumo del agua en el hogar, el cual utilizó dos sensores de flujo para medir la cantidad de agua suministrada por la red pública de agua potable y la cantidad de agua consumida por el usuario en la vivienda. Este sistema mostrara al usuario en tiempo real la cantidad de agua en litros con la que dispone, por medio de una interfaz gráfica, la cual puede acceder por medio de un dispositivo móvil o computadora dentro de su red de área local. Logrando de esta manera que el usuario pueda trazar un plan de acción para gestionar de la mejor manera el uso adecuado del agua.

Palabras clave – Comunicación inalámbrica, internet de las cosas, monitoreo remoto, sistema ciber-físico.

Abstract – Water is an essential resource in the home, since with this resource different daily activities are carried out such as: showering, brushing teeth, washing hands, preparing food, washing dishes, washing clothes, among others. Many of the times when carrying out these activities, more water is consumed than necessary, causing its waste, this is mainly due to the fact that the user is not aware and does not know the amount of water they use, nor the amount of water they have. This article presents the design of a cyber-physical system for monitoring water consumption in the home, which used two flow sensors to measure the amount of water supplied by the public drinking water network and the amount of water consumed. by the user in the home. This system shows the user in real time the amount of water in liters with which he has available, through a graphical interface, which he can access through a mobile device or computer

within his local area network. Achieving in this way that the user can draw up an action plan to better manage the proper use of water.

Keywords – Cyber-physical systems, internet of things, remote monitoring, wireless communication.

I. INTRODUCCIÓN

El agua es utilizada en prácticamente todas las actividades del ser humano, se encuentra presente en la industria, en la agricultura, en la generación de energía, en el sector salud, en la economía, el transporte, las ciudades y el hogar [1][2]. Pero debido al uso irresponsable y desmedido de este recurso, así como el aumento acelerado de la población mundial ha producido su escases en diferentes partes del planeta. Aproximadamente cerca del 50% del agua suministrada a las ciudades se desperdicia [3]. Se prevé para el año 2050 más del 40% de las poblaciones mundiales se enfrentarán a la escasez de agua[4].

Para lograr un consumo responsable del agua en el hogar, solo es posible si el habitante conoce la cantidad de agua que utiliza y la cantidad de agua disponible para él, sin comprometer los recursos de las personas que lo rodean, ni de las generaciones futuras[3]. En base a lo anteriormente planteado, surge la necesidad de implementar un sistema que sea capaz de adquirir información de su entorno y reaccionar en consecuencia[5]. Tal es el caso de los sistemas ciber-físicos, los cuales son sistemas físicos dotados de capacidades de computación y de comunicación[6][7], que permiten controlar y monitorear los procesos físicos o actividades del mundo que nos rodea. Estos sistemas la mayoría de las veces

consisten en un conjunto de dispositivos IOT (internet de las cosas), que interactúan y cooperan entre sí, para lograr un objetivo en específico [8][9].

El objetivo de este trabajo es diseñar un sistema ciber-físico que monitoree el consumo y suministro del agua en el hogar, permitiendo al usuario trazar un plan de acción para gestionar de la mejor manera el uso adecuado del agua.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección II se describe el funcionamiento y diseño del sistema ciber-físico, así como las partes que lo componen. La sección III se presentan los resultados obtenidos y en el IV se muestran las conclusiones y trabajo a futuro.

II. METODOLOGÍA

A. Descripción general

Para que el habitante pueda adquirir un consumo responsable del agua, es necesario que conozca la cantidad de agua que le es suministrada y la cantidad de agua que consume, permitiéndole trazar un plan de acción, para gestionar de una mejor manera el uso del agua en su vivienda.

Las áreas o lugares en el hogar donde el agua está disponible para su utilización es en el baño (regadera, lavamanos, retrete), en la cocina (fregadero), en el patio o jardín (uno o más grifos para regar las plantas) y en el cuarto de lavado (lavadora y lavadero). Permitiendo que el habitante pueda realizar sus actividades del día a día, las cuales son: en el aseo personal (ducharse, cepillarse los dientes, lavarse las manos), en el inodoro, lavar y enjuagar la ropa, en la realización de los alimentos, lavar los trastes, limpieza del hogar, regar el jardín.

En la gran mayoría de los hogares en zonas urbanas y rurales en México, el agua potable es almacenada en tinacos y cisternas ya que su abastecimiento, por la red de distribución de agua municipal no es constante, es decir, se producen varios cortes del servicio o en su defecto, el agua solo es suministrada por periodos cortos de tiempo, obligando a contar con un depósito de agua de mayor capacidad. Es por ello que administrar el agua eficientemente le permitirá al usuario contar con este recurso para realizar sus actividades diarias.

Para monitorear el consumo de agua en el hogar, el sistema dispondrá de 2 sensores de flujo uno a la entrada del suministro de la red pública de agua potable, el cual sumará la cantidad de volumen de agua que ingresa a la vivienda y otro a la salida del depósito de agua (tinaco), el cual restará la cantidad de agua consumida ver figura 1.

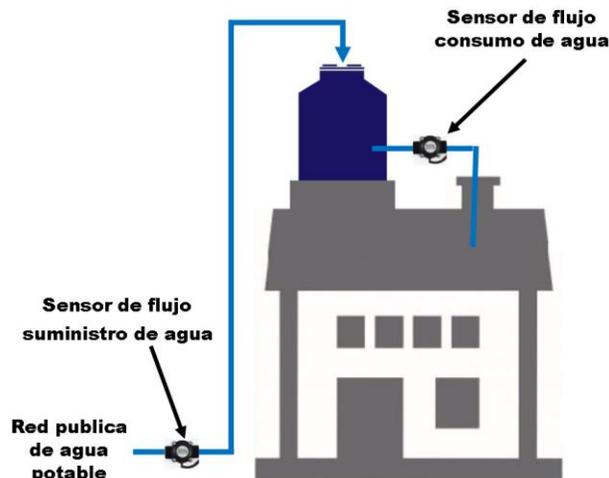


Fig. 1. Localización de los sensores de flujo de agua

B. Funcionamiento del sistema

El sistema ciber-físico utiliza el protocolo de comunicación MQTT, el cual es un protocolo publish/subscribe basado en tópicos en el que los clientes envían y reciben mensajes que son gestionados por un elemento central llamado bróker. Por lo tanto, el protocolo MQTT presenta una topología de red en estrella. MQTT (Message Queue Telemetry Transport) nos permite enviar datos de telemetría como mensajes, a través de redes de alta latencia, el cual, está pensado principalmente para redes inalámbricas con bajo ancho de banda, permitiendo la comunicación Machine to Machine e internet de las cosas (IoT), este protocolo opera en la capa de aplicación ejecutándose sobre TCP/IP, este protocolo, define dos tipos de entidades de red, un bróker (intermediario de mensajes) y varios clientes, el bróker es un servidor que recibe todos los mensajes publicados por los clientes y luego los envía a sus respectivos subscriptores conectados a un topic en específico, un cliente es cualquier dispositivo (un microcontrolador, una computadora, un dispositivo móvil, un servidor, entre otros)[10]. Estas características lo hacen ideal en la comunicación de dispositivos del internet de las cosas. En nuestro caso se utilizó Eclipse Mosquitto, el cual es un bróker de mensajería de código abierto que implementa el protocolo MQTT[11]. En la figura 2 se puede observar el funcionamiento general del sistema, donde el bróker MQTT y la herramienta de desarrollo basada en flujo Node-Red están montados sobre la placa Raspberry pi, el módulo ESP-WROOM-32 obtiene la información percibida por los sensores de flujo, los cuales, publican un mensaje por medio de un tópic hacia el bróker MQTT, el bróker envía estos mensajes a un servidor basado en flujo programado con Node-Red. El servidor mostrará en tiempo real la diferencia entre el volumen de agua suministrado y el volumen de agua consumido en litros, en un tablero (dashboard), el cual solo será visible dentro de una red de área local, en un dispositivo móvil o computadora. El servidor almacenara el volumen de agua con la que dispone el habitante en una base de datos NoSQL de

Firebase.

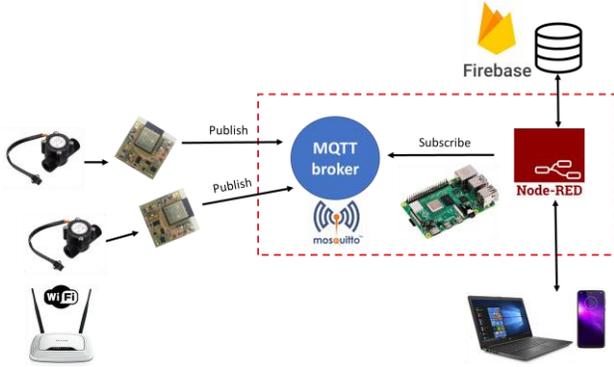


Fig. 2. Diagrama del funcionamiento del sistema

C. Raspberry pi 4 modelo B

Se utilizó la placa Raspberry pi 4 modelo B de 8 GB RAM para ejecutar el bróker MQTT y la herramienta de desarrollo basado en flujo Node-RED, el cual es un pequeño ordenador de placa única o placa reducida de bajo coste, desarrollado en el Reino Unido por la fundación del mismo nombre “Raspberry Pi” ver figura 3[11].



Fig. 3. Raspberry pi 4 modelo B

D. Diseño de placa de circuito impreso (PCB)

Para que los sensores de flujo puedan transmitir la información que perciben se diseñó una placa de circuito impreso (PCB), la cual, incorpora el módulo ESP-WROOM-32, este módulo de bajo coste creado por la empresa Espressif Systems posee tecnologías de WiFi y Bluetooth integradas, dos núcleos de procesamiento y tecnología de bajo consumo, que, en relación a su bajo precio lo hacen el dispositivo ideal para este fin. El módulo ESP-WROOM-32 integra el SoC ESP32-D0WDQ6, un cristal de 40Mhz y una antena MIFA, ver figura 4[12].



Figura 4. Módulo ESP-WROOM-32

Este circuito impreso (PCB) también incorpora un sistema de recolección de energía del medio que lo rodea, para su funcionamiento, el cual, gestiona, acondiciona y almacena en una batería recargable, como se muestra en el diagrama de la figura 5[13].

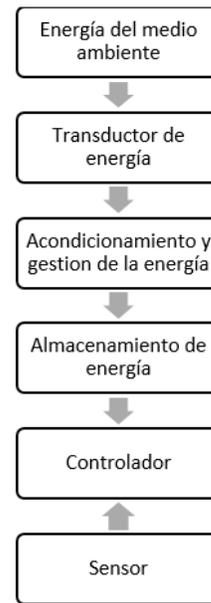


Fig. 5. Diagrama de un sensor inalámbrico autoalimentado.

Se utilizó la luz solar como fuente de energía para recargar una batería Li-ion con una capacidad de 6000mAh a 3.7V, para ello, una pequeña celda solar de 5v, 160mA como transductor de energía. Para el acondicionamiento y gestión de la energía se hizo uso del circuito integrado TP4056, el cual, es un cargador de baterías de iones de litio de corriente continua. Así como de un regulador de voltaje AMS1117-3.3 de 1A a 3.3V, el cual, es un regulador de voltaje lineal de corriente directa (DC). El diseño de este circuito se puede observar en la figura 6.

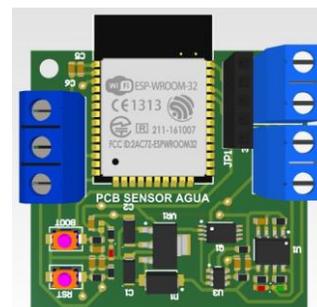


Fig. 6. Prototipo del PCB.

E. Sensor de flujo de agua

Para medir el volumen de agua suministrada y consumida por los habitantes se utilizó un sensor de flujo YF-S201 para una tubería de ½ pulgada de diámetro, ver figura 7, el sensor internamente incorpora un rotor, el cual está unido a un pequeño imán, al ingresar agua al interior del dispositivo, el rotor gira junto con el imán, haciendo que un sensor de efecto hall detecte las variaciones del campo magnético, generando cierta cantidad de pulsos por volumen desplazado.



Fig. 7. Sensores de flujo de agua

El sensor YF-S201 opera a un rango de flujo de 1-30 L/min, una presión de trabajo máxima de 1.27MPa, temperatura de funcionamiento de 25°C a 80°C, un volumen promedio por pulso de 2.25 ml, 450 pulsos por litros, un factor de conversión $K=7.5$, para convertir de frecuencia de pulsos (Hz) a caudal (L/min), un rango de voltaje de 5-24Vdc, un error de 5 %, el fabricante nos proporciona la fórmula (1) para determinar el caudal [14]:

$$Q\left(\frac{L}{\text{min}}\right) = \text{frecuencia de pulsos(Hz)} / k \quad (1)$$

En nuestro caso contaremos la cantidad de pulsos que detecta el sensor en un segundo, para ello utilizaremos las interrupciones por hardware, en el módulo ESP-WROOM-32 todos los pines GPIO pueden ser configurados como interrupciones. Cada vez que ocurra una interrupción, esta interrupción se sumará a un contador, para ello configuraremos el pin GPIO27 como interrupción, la cual ocurrirá cada flanco positivo de pulso. Para determinar el volumen se utilizará la fórmula del gasto volumétrico (2) descrita a continuación:

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2)$$

Donde Q es el caudal en (L/min), ΔV es la diferencia de volumen y Δt es la diferencia de tiempo, despejando el volumen de la formula (2) nos quedaría de la siguiente manera:

$$V = V_0 + Q(t_0 - t) \quad (3)$$

El mensaje con la cantidad de volumen detectada por el sensor ubicado a la entrada de la red pública de agua potable se publica en el topic: “sensor_de_flujo/suministro_de_agua/

volumen” y el mensaje con la cantidad de volumen detectada por el sensor ubicado a la salida del tinaco de agua se publica en el topic: “sensor_de_flujo/consumo_de_agua/volumen”.

El módulo ESP-WROOM-32 envía el mensaje con la cantidad de volumen registrada por actividad, siguiendo la lógica descrita en el diagrama de estados de la figura 8.

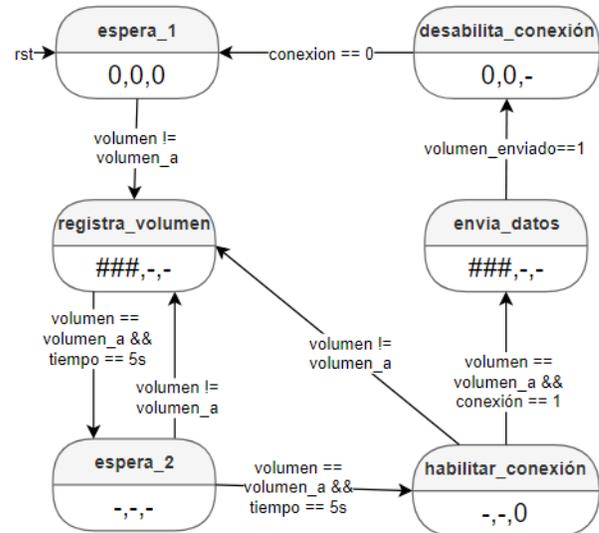


Fig. 8. Diagrama de estados del funcionamiento del prototipo que controla el sensor

El diagrama de estados cuenta con 3 salidas, ordenadas de la siguiente manera; volumen registrado, conexión y volumen_enviado (nota: los 3 signos de numeral “###” representan un numero positivo diferente de cero, el signo “-” significa que no se emite ningún valor en esa salida). En el estado espera_1 las 3 salidas se mantienen en cero, este estado cambia, al estado registra_volumen, cuando el volumen sea diferente al volumen anterior, es decir, cuando el sensor de flujo genere el primer pulso, en este estado se registrará la cantidad de volumen de agua que circula al interior del sensor, cuando el volumen sea igual al volumen registrado con anterioridad y haya transcurrido un tiempo igual a 5 segundos, el estado cambiara a espera_2. En el estado espera_2 se vuelve a confirmar, que el volumen no ha cambiado en un tiempo de 5 segundos, de ser esto verdad el estado pasará al estado habilitar_conexion, por otro lado, si el volumen cambia antes de que el tiempo sea igual a 5 segundos, el estado volverá a registra_volumen.

El estado habilitar_conexion, habilita la conexión wifi y la conexión al protocolo MQTT, este estado cambia a enviar_datos si la conexión fue exitosa y el volumen no ha cambiado, por otro lado, si el volumen cambia mientras se realiza la conexión, el estado volverá a registra_volumen. En el estado envia_datos, se publicará el mensaje con la cantidad de volumen de agua registrada, hacia el bróker por medio del topic correspondiente a cada sensor. Una vez el mensaje fue enviado, el estado pasa a estado desabilita_conexion. En este estado el volumen registrado se inicializa en cero, de la misma manera, a la salida “conexión” se le asigna el valor cero para que cambie al estado inicial espera_1.

F. Node-RED

Se implementó Node-RED para programar el servidor de nuestro sistema, el cual, es una herramienta de desarrollo basada en flujo, desarrollada por IBM para conectar dispositivos de hardware, API y servicios en línea como parte del internet de las cosas (IoT), esta herramienta busca simplificar la integración de código y funciones, a través de bloques, se basa en un enfoque de programación visual que permite a los desarrolladores conectar los bloques de código predefinidos, conocidos como nodos, estos nodos pueden ser nodos de entrada, nodos de procesamiento y nodos de salida. Node-RED proporciona un editor de flujo basado en navegador que facilita la conexión de flujos mediante la amplia gama de nodos que integra[15].

Se utilizaron 7 tipos de bloques de Node-Red en nuestro servidor, estos son: mqtt in, change, function, firebase modify, firebase.on, text y gauge ver figura 9.

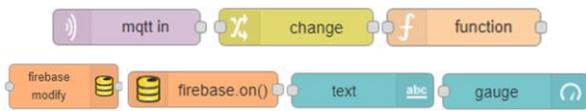


Fig. 9. Tipos de bloques de Node-Red utilizados

El bloque “mqtt in” es un bloque de entrada tipo red, el cual, nos permite suscribirnos a un topic en específico y poder recibir el mensaje, en nuestro caso el bloque “sensor suministro de agua” está suscrito al topic: “sensor_de_flujo/ suministro_de_agua/volumen”, el cual, recibe el mensaje publicado por el sensor de flujo ubicado a la entrada de la red pública de agua potable y el bloque “sensor consumo de agua” suscrito al topic: “sensor_de_flujo/consumo_de_agua/volumen”, el cual, recibe el mensaje publicado por el sensor de flujo ubicado en la salida del tinaco.

El bloque “function” es un bloque de procesamiento, el cual, nos permitirá crear una función, en nuestro caso se crearon 3 funciones; la función con nombre “suministro” suma el volumen de agua suministrado al volumen de agua existente en la vivienda cada vez que se publica un mensaje en el topic: “sensor_de_flujo/ suministro_de_agua/volumen”, la función con nombre “consumo” resta el volumen de agua consumido al volumen de agua existente cada vez que se publica un mensaje en el topic: “sensor_de_flujo/consumo_de_agua/volumen” y la función con nombre “volumen de agua disponible” le agrega el sufijo “lts” al volumen de agua existente para mostrarlo por la interfaz de usuario (dashboard).

El bloque “firebase modify”, nos permite almacenar, actualizar y eliminar datos en una base de datos firebase, en nuestro caso se utilizó para almacenar y actualizar el volumen existente en la vivienda. Por otro lado, el bloque firebase.on genera un mensaje con el valor del volumen existente, cada vez que se actualiza este valor en la base de datos firebase.

El bloque “change” nos permite almacenar valores en una variable de flujo, en nuestro caso se utilizaron 3 bloques de este tipo, el primero, almacena el volumen de agua suministrado, en la variable “var2”, el segundo bloque

almacena la diferencia entre el volumen suministrado y el volumen consumido en la variable “var1” y en el tercer bloque, se almacena el volumen de agua consumido en la variable “var3”. En la figura 10 se observa el diagrama de flujo de bloques del servidor.

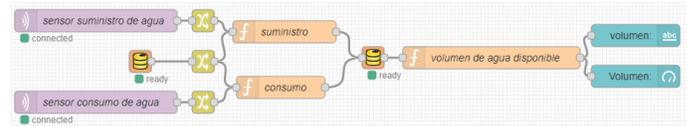


Figura 10. Diagrama de flujo de bloques del servidor

El bloque “text in” muestra el valor del volumen de agua disponible en la vivienda en litros en la interfaz de usuario (dashboard) en forma de texto, en cambio el bloque “gauge” muestra este valor de forma gráfica.

III. RESULTADOS

El sistema ciber-físico de monitoreo del agua logro medir la cantidad de agua suministrada por la red pública de agua potable, así como medir la cantidad de agua consumida, por medio de dos sensores de flujo, siendo capaz de mostrar la cantidad de agua existente en la vivienda en una interfaz gráfica, como se aprecia en la figura 11.

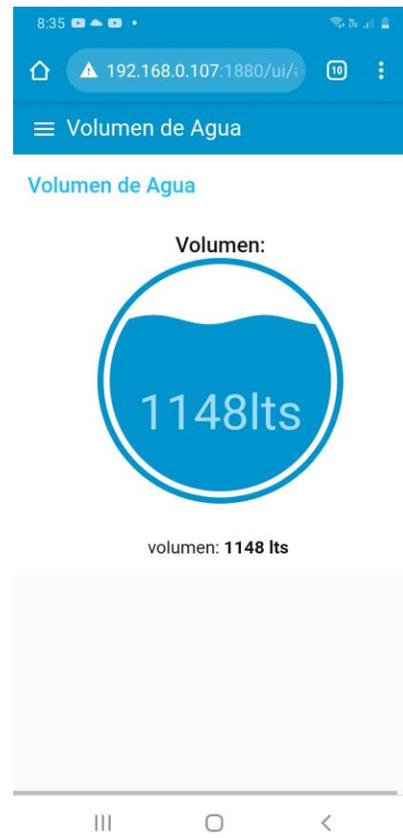


Figura 11. Interfaz de usuario

Este sistema le permitió al habitante conocer en todo momento la cantidad de agua con la que dispone, priorizando la utilización del agua en las actividades que le resultaran más relevantes, al momento en que sus reservas de agua son pocas

y aún falta tiempo para que se le vuelva a suministrar. En la figura 12, se muestra la instalación de los dos sensores, el de la izquierda fue instalado a la entrada del suministro de la red pública de agua potable, el de la derecha se instaló en la salida del depósito de agua (tinaco).



Figura 12. Instalación de los sensores

IV. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

La implementación de un sistema ciber-físico de monitoreo del volumen de agua, le permite al usuario saber en todo momento la cantidad de agua con la que dispone, lo cual es esencial para que pueda realizar una mejor gestión de este recurso, sobre todo en lugares donde el abastecimiento del agua se da una vez cada semana. Como trabajo futuro se pretende incorporar un algoritmo de clasificación para reconocer la cantidad de volumen consumido en determinada actividad, así como la detección de fugas de agua, incorporando electroválvulas para abrir o cerrar el flujo de agua.

REFERENCIAS

- [1] Z. Wang *et al.*, “Cyber-physical systems for water sustainability: challenges and opportunities,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 5, pp. 216–222, May 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7105668.
- [2] T. Perumal, M. N. Sulaiman, and C. Y. Leong, “Internet of Things (IoT) enabled water monitoring system,” in *2015 IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics, GCCE 2015*, 2016, pp. 86–87, doi: 10.1109/GCCE.2015.7398710.
- [3] P. Arun Mozhi Devan, K. Pooventhan, C. Mukesh Kumar, and R. Midhun Kumar, “IoT Based Water Usage Monitoring System Using LabVIEW,” in *Advances in Science, Technology and Innovation*, Springer Nature, 2019, pp. 205–212.
- [4] S. A. Abdulrahman, “The water paradox: overcoming the global crisis in water management,” *Int. J. Environ. Stud.*, vol. 76, no. 4, pp. 714–719, Jul. 2019, doi: 10.1080/00207233.2019.1594237.
- [5] N. Balta-Ozkan, O. Amerighi, and B. Boteler, “A comparison of consumer perceptions towards smart homes in the UK, Germany and Italy: reflections for policy and future research,” *Technol. Anal. Strateg. Manag.*, vol. 26, no. 10, pp. 1176–1195, Nov. 2014, doi: 10.1080/09537325.2014.975788.
- [6] R. Rajkumar, I. Lee, L. Sha, and J. Stankovic, “Cyber-physical systems: The next computing revolution,” in *Proceedings - Design Automation Conference*, 2010, pp. 731–736, doi: 10.1145/1837274.1837461.
- [7] E. A. Lee, “Cyber physical systems: Design challenges,” *Proc. - 11th IEEE Symp. Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distrib. Comput. ISORC 2008*, pp. 363–369, 2008, doi: 10.1109/ISORC.2008.25.
- [8] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, “The Internet of Things: A survey,” *Comput. Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.
- [9] Q. Do, B. Martini, and K.-K. R. Choo, “Cyber-physical systems information gathering: A smart home case study,” *Comput. Networks*, vol. 138, pp. 1–12, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.comnet.2018.03.024.

- [10] “mqtt-v5.0,” 2019.
- [11] “Eclipse Mosquitto.” [Online]. Available: <https://mosquitto.org/>. [Accessed: 16-Apr-2021].
- [12] “ESP32-WROOM-32E & ESP32-WROOM-32UE Datasheet,” 2021.
- [13] A. Ruano, S. Silva, H. Duarte, and P. M. Ferreira, “Wireless Sensors and IoT Platform for Intelligent HVAC Control,” *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 3, p. 370, Mar. 2018, doi: 10.3390/app8030370.
- [14] “YF-S201.” [Online]. Available: http://www.mantech.co.za/Datasheets/Products/YF-S201_SEA.pdf. [Accessed: 14-Apr-2021].
- [15] “Node-RED.” [Online]. Available: <https://nodered.org/>. [Accessed: 22-Mar-2021].