

SISTEMA IOT PARA MONITORIZAR Y CONTROLAR UN PROTOTIPO PARA EL TRATAMIENTO DOMÉSTICO DE AGUAS RESIDUALES

IOT SYSTEM TO MONITOR AND CONTROL A PROTOTYPE FOR DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT

Grecia Nefertari Flores Martínez

Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco, México
gnfm@azc.uam.mx

Carlos Ernesto Carrillo Arellano

Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco, México
ceca@azc.uam.mx

Leonardo Daniel Sánchez Martínez

Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco, México
ldsm@azc.uam.mx

Recepción: 23/noviembre/2023

Aceptación: 26/diciembre/2023

Resumen

El tratamiento de aguas residuales es una estrategia que contribuye a solucionar el problema global del agua, y los avances tecnológicos ofrecidos por el IoT pueden ayudar a implementar esta solución eficientemente. Por ello, en este artículo se diseña y evalúa un sistema IoT para gestionar un prototipo para el tratamiento doméstico de aguas residuales. El sistema es segmentado en tres fases, y cada una es controlada por microcontroladores ESP32. Los microcontroladores recolectan datos provenientes de diferentes sensores y los envían a través de Internet hasta un agente MQTT para hacerlos accesibles a otros elementos del sistema. Gracias al modelo de comunicación *subscriber-publisher*, los microcontroladores no solo envían información al agente MQTT, sino que también se coordinan intercambiando datos. Finalmente, mediante una aplicación gráfica se monitoriza y controla remotamente el proceso. Los resultados muestran que las tecnologías del IoT son una excelente alternativa para gestionar un sistema de tratamiento de aguas residuales.

Palabras Clave: IoT, Microcontrolador, Tratamiento doméstico de agua, Prototipo.

Abstract

Domestic wastewater treatment is a strategy that contributes to solve the global water problem, and the technological advances offered by the IoT can implement this solution efficiently. Therefore, in this article an IoT system is designed and evaluate to manage a prototype for domestic wastewater treatment. The system is segmented into three phases, and each phase is controlled with ESP32 microcontrollers. Microcontrollers collect data from different sensors and send it over the Internet to a central MQTT agent to make it accessible to other elements of the system. Thanks to the subscriber-publisher communication model, microcontrollers not only send information, but also coordinate the process. Finally, the process is monitored and controlled through a graphic application. The results show that IoT technologies are an excellent alternative to manage a domestic water treatment system.

Keywords: *IoT, Microcontroller, Automation, Domestic wastewater treatment, Prototype.*

1. Introducción

De acuerdo con la ONU, el agua es un recurso fundamental para el desarrollo económico, social y para la sustentabilidad ambiental global. Sin embargo, este recurso ha sido subvalorado por años. Por ello, diversas proyecciones afirman que en el agua escaseará para un 40% de la población mundial y esto se agravará por los efectos negativos del cambio climático. Por fortuna, en años recientes han surgido numerosas propuestas orientadas a atender esta problemática, siendo el tratamiento de aguas residuales una de ellas [Martínez, 2020].

El Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés) actualmente tienen un rol trascendental para numerosas aplicaciones. El sistema IoT (Figura 1) otorga a “objetos” la capacidad de:

- Analizar su entorno.
- Interactuar con su entorno.
- Comunicarse con otros objetos para compartir información.
- Tomar decisiones .

- Realizar acciones individuales y colectivas [Al-Fuqaha, 2015].

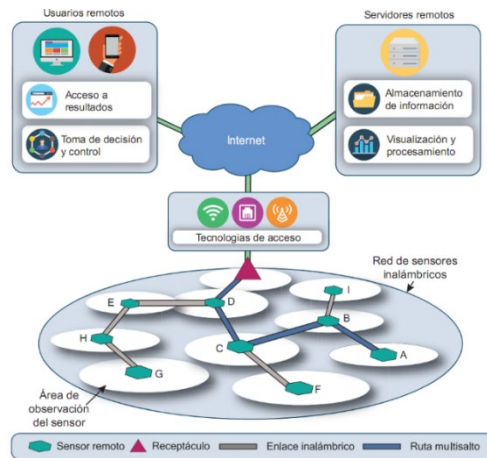


Figura 1 Esquema general de un sistema basado en el IoT.

El IoT basa su operación en sensores remotos que: recolectan información de su entorno, interactúan con su entorno y transmiten datos. Comúnmente, un sistema IoT también requiere de: nodos especiales para conjuntar datos obtenidos por los sensores (estos nodos son conocidos como receptáculos o *sinks*), sistemas para el almacenamiento y procesamiento de datos, y aplicaciones para visualizar (*dashboards*) la información recolectada.

Últimamente, el IoT ha ganado enorme popularidad, de manera que se utiliza en aplicaciones que van desde la gestión de transporte público, alumbrado inteligente e incluso en aplicaciones de automatización industrial y monitorización ambiental. Es en esta última área de aplicación en donde el IoT ha mostrado que puede tener un gran impacto social. Por ejemplo, el IoT se ha empleado para la monitorización de la contaminación del aire [Metia, 2021], el reporte de condiciones climatológicas [Meera, 2021], la detección incendios forestales [Avazov, 2023], entre otras. Consecuentemente, las tecnologías del IoT también podrían utilizarse para monitorizar y controlar los sistemas de tratamiento de aguas. Destacan varios ejemplos que sustentan esta aseveración: en [Ranjbar, 2017] se propone un sistema de monitorización en tiempo real de la calidad del agua empleando microcontroladores y sensores; similarmente, en [Nitish, 2021] se utilizan sensores de turbidez, temperatura, pH (Potencial de Hidrogeno) y TSD (Total de Solidos

Disueltos), todos ellos para monitorizar en tiempo real la calidad del agua y brindar información centralizada en la nube para monitorizar la calidad del recurso e incluso detectar fugas. En [Karn, 2023] se propone un sistema inteligente de tratamiento de aguas empleando las tecnologías provistas por el IoT; se emplean numerosos sensores en diferentes fases del proceso y la información recolectada es transmitida utilizando tecnología IEEE 802.15.4 a nodos centralizados para posteriormente almacenarla en la nube y presentarla en un *dashboard*. Finalmente, en [El-Sayed, 2019] emplean sensores de alcalinidad, turbidez, conductividad y TDS para medir la pureza del agua en una planta de tratamiento de agua; estos sensores son conectados a tarjetas de desarrollo Arduino y los datos recolectados son transmitidos a una plataforma de análisis en la nube denominada como *ThingSpeak*. Los datos son evaluados constantemente en la nube y contrastados con umbrales definidos por los autores, si las mediciones de los sensores superan los umbrales, entonces un sistema de alarma notifica fallas en tiempo real a los administradores de la planta de tratamiento.

Considerando los beneficios significativos que ofrece el IoT en aplicaciones ambientales, en este trabajo se presenta el diseño, implementación y verificación de un sistema IoT para monitorizar y controlar un prototipo para el tratamiento doméstico de aguas residuales. Empleando un conjunto de sensores y microcontroladores, el sistema IoT propuesto obtiene parámetros químicos del agua tratada que ayudan a determinar la eficiencia del proceso, dichos parámetros son enviados por Internet hasta un broker MQTT para ser retransmitidos a otros elementos del sistema, tales como una base de datos y un *dashboard* que muestra al usuario el estado del proceso. Mediante el *dashboard*, el usuario no solo visualiza el estado del proceso de tratamiento, sino que también puede modificar la configuración del proceso. A continuación, se detalla el sistema propuesto y la metodología empleada para su implementación y verificación.

2. Métodos

El tratamiento de aguas residuales emplea procesos biológicos, químicos y físicos para remover contaminantes del agua que pueden ser dañinos [Crini, 2018].

Existen cuatro procesos fundamentales para el tratamiento de aguas: coagulación, floculación, sedimentación y filtrado. Estos procesos permiten separar sólidos finos suspendidos en el agua que pueden tardar mucho tiempo para asentarse de forma natural. Para acelerar este proceso se agitan coagulantes en el agua contaminada con el objetivo de alterar la carga eléctrica de las partículas suspendidas, provocando así que se aglutinen rápidamente y formen flóculos; la cantidad de coagulante, la velocidad y el tiempo de agitación de este proceso son factores que dependen de las condiciones del agua residual y del resultado esperado. Una vez que los flóculos se han formado, el agua pasa por el proceso de sedimentación, que consiste en esperar a que los flóculos se sedimenten hasta formar un lodo de sedimentación. Finalmente, el lodo de sedimentación se separa del agua tratada, y finalmente el agua pasa por un último proceso de filtrado. La figura 2, muestra la interacción entre estos procesos.

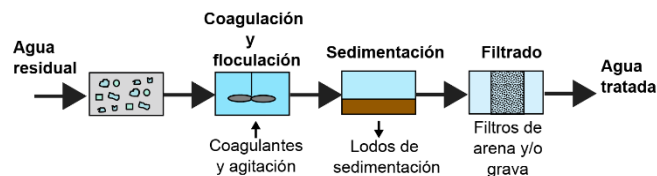


Figura 2 Fases para el tratamiento de aguas residuales.

Módulos del sistema

El sistema IoT propuesto en este trabajo se muestra en la figura 3. Además, el sistema propuesto es evaluado en un prototipo. El sistema está diseñado para utilizarse en el hogar, y el agua tratada podrá reutilizarse. El proceso consta de cuatro módulos, los cuales se muestran en la figura 3:

- **Módulo 1 - Llenado** . El objetivo de este módulo es almacenar el agua residual en el “Contenedor 1” y determinar si el agua residual puede ser transferida al “Contenedor 2” para su tratamiento. Tal como se observa en la figura 3, se utilizaron cuatro sensores analógicos de nivel: dos localizados en el “Contenedor 1” y dos más en el “Contenedor 2”. Además, se utilizaron dos bombas de agua sumergibles, una para impulsar el agua residual al “Contenedor 1”, y la otra para transferir el agua del Contenedor 1 al

“Contenedor 2”. Los modelos de los sensores y las bombas empleadas se muestran en la figura 4. Los sensores de nivel del “Contenedor 1” se emplean para determinar si hay agua residual suficiente en el Contenedor para pasar agua residual a la siguiente etapa del proceso, mientras que los sensores de nivel del “Contenedor 2” notifican si hay espacio disponible para recibir más agua residual y realizar el tratamiento de agua.

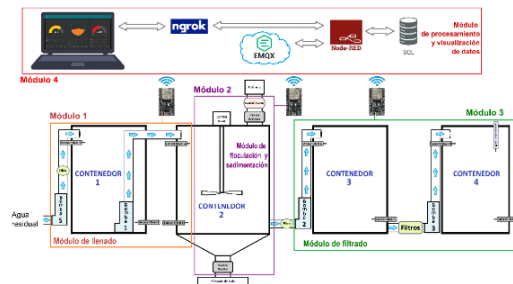


Figura 3 Sistema IoT para el control y monitorización del proceso de tratamiento de agua.

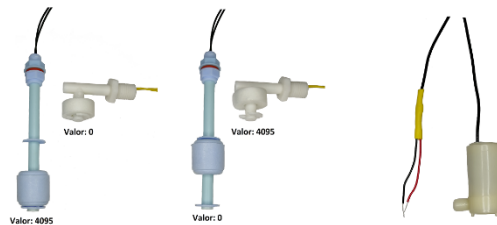


Figura 4 Sensores de nivel y bombas de agua sumergible empleados en el prototipo.

Los sensores de nivel y el control de las bombas son conectados a un SOC (*System on a Chip*) ESP32, el diagrama de conexión se muestra en la figura 5. Los sensores de nivel son conectados directamente al SOC ESP32 y las bombas son conectadas empleando un sistema de relevadores.

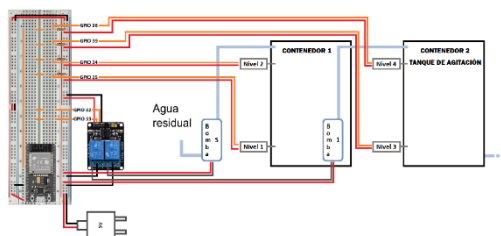


Figura 5 Diagrama de conexiones del módulo de llenado.

El SOC ESP32 se conecta a un Punto de Acceso (AP) inalámbrico que brinda conectividad a Internet, de esta manera el SOC puede conectarse al broker público MQTT EMQX, cuya URL es “broker.emqx.io”. El SOC y el broker intercambian mensajes empleando el protocolo MQTT, siendo este un protocolo de mensajería basado en el modelo *subscriber-publisher*, y diseñado específicamente para el IoT [Quincozes, 2019]. Al usar un broker público, se pueden configurar diferentes tópicos y suscribir otras entidades a ellos. Los tópicos configurados en el broker público para esta etapa se detallan en la figura 6. Además, en la figura se detallan los tópicos a los cuales se suscribe el agente Node-RED, el cual se utilizará para almacenar información en la base de datos y para diseñar el *dashboard*.

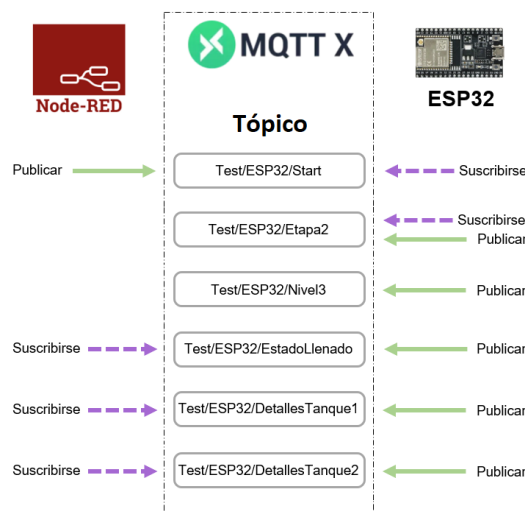


Figura 6 Tópicos, suscriptores y publicadores para el módulo 1.

El SOC ESP32 recibe la señal de inicio del proceso en el tópico “Test/ESP32/Start”; quien publica en ese tópico es la entidad Node-RED. Por otro lado, el SOC publica en el broker MQTT el estado de la “Etapa 1”, y recibe mensajes del estado de la “Etapa 2” que le notifican si debe encender la bomba 1 para llenar del “Contenedor 2”. Para realizar esta coordinación se utiliza una bandera que se publica en el tópico “Test/ESP32/Etapa2”. El valor que debe tener la bandera de coordinación para que el ESP32 llene el “Contenedor 2” es “0”.

Cuando concluye el proceso de llenado del “Contenedor 2”, ya sea porque no hay agua disponible en el “Contenedor 1” o porque se llenó el contenedor, se publicará el valor “1” en el tópico “Test/ESP32/Etapa2”. Asimismo, el SOC ESP32 publica en los tópicos “Test/ESP32/DetallesTanque1” y “Test/ESP32/DetallesTanque2” los tres posibles estados que tienen los contenedores 1 y 2 respectivamente: Vacío, Con Agua o Lleno, esta información es utilizada para que el usuario pueda visualizar el estado del proceso desde el *dashboard*.

- **Módulo 2 - Floculación y sedimentación.** En este módulo se realizan procesos para el tratamiento del agua. El “Contenedor 2”, tiene incorporados dos sensores de nivel, iguales a los que se utilizan en el Módulo 1. Además, se incorpora en el prototipo un motor de agitación, el cual es implementado con un servomotor SG90. La entrada del agente coagulante para la floculación es monitorizada mediante un caudalímetro YF-S201 y controlada con ayuda de una electroválvula de 12 voltios. También, la salida por donde se expulsa el lodo de sedimentación está controlada con una electroválvula de 12. Estos elementos se muestran en la figura 7.



Figura 7 Dispositivos empleados para controlar la etapa de floculación y sedimentación.

El control de esta etapa es realizado por un segundo SOC ESP32 y la interconexión de estos dispositivos se muestra en la figura 8. Como se puede apreciar, el caudalímetro y el servomotor se conectan directamente al SOC, mientras que las electroválvulas son conectadas mediante relevadores. El SOC se conecta a Internet empleando conectividad Wi-Fi, de manera que puede enviar y recibir mensajes MQTT desde el broker público EMQX. Los tópicos a los que se suscribe y en los que publica el SOC se muestran en la figura 9.

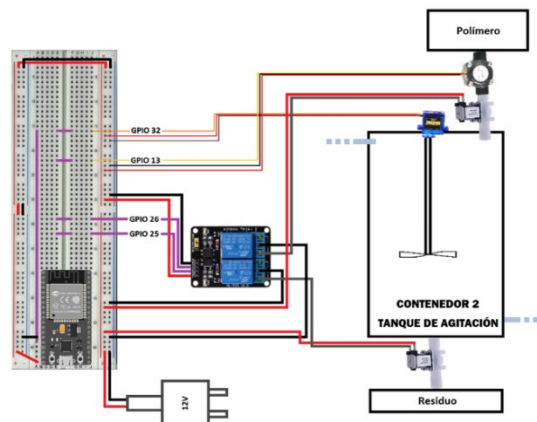


Figura 8 Diagrama de conexiones del módulo de floculación y sedimentación.

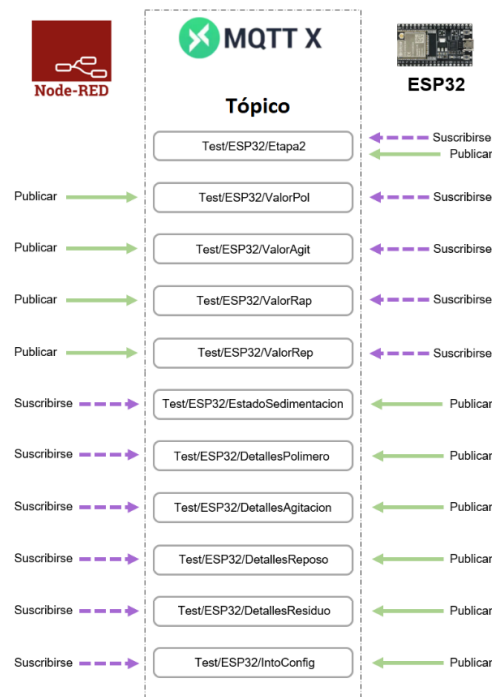


Figura 9 Tópicos, suscriptores y publicadores para el módulo 2.

La cantidad de polímero que se agrega al “Contenedor 2” es monitorizado con el caudalímetro y controlado con ayuda de una electroválvula. La cantidad de polímero que se utiliza en esta etapa es definida empleando el tópico MQTT “Test/ESP32/ValorPol”; por lo tanto, el SOC esta suscrito a este tópico y la entidad Node-Red es quien publica en este tópico.

El motor de agitación puede operar con tres diferentes velocidades, Lento, Medio y Rápido. Por medio de los tópicos “Test/ESP32/ValorRap”, “Test/ESP32/ValorAgit” y “Test/ESP32/ValorRep”, la entidad Node-RED configura la velocidad de agitación, el tiempo de agitación y el tiempo de reposo respectivamente.

El SOC ESP32 publica en diferentes tópicos el estado del proceso para que el agente Node-RED pueda guardar esa información en la base de datos y mostrarla en el *dashboard*. Además, cuando el tiempo de reposo de la etapa de coagulación y sedimentación termina, el SOC activa la electroválvula de residuo para que los lodos de sedimentación sean retirados del “Contenedor 2”. La extracción del lodo de sedimentación se realiza por gravedad, y el tiempo de apertura de la electroválvula de residuo se establece como un valor constante para el prototipo, en este caso fueron 5 segundos. Cuando se ha retirado el lodo de sedimentación, el SOC cierra la electroválvula de residuo y notifica al agente EMQX que esta etapa ha terminado. Es decir, Cuando todo el proceso de sedimentación termina, el SOC publica el valor “-1” en el tópico de la bandera de coordinación “Test/ESP32/Etapa2”. Finalmente, el SOC publica en el broker MQTT todos los parámetros de configuración de esta etapa en el tópico “Test/ESP32/InfoConfig” para que Node-RED almacene esta información en la base de datos. Es así como finaliza la etapa de coagulación y sedimentación, iniciando la última fase de filtrado.

- **Módulo 3 - Filtrado.** Este módulo utiliza un SOC ESP32 para controlar el traslado del agua resultante del proceso de floculación y sedimentación hacia el tercer contenedor mediante una bomba sumergible. Posteriormente se traslada el agua clarificada a través filtros y se deposita en el último contenedor empleando una segunda bomba sumergible. Para monitorizar la cantidad de agua que se almacena en los contenedores 3 y 4 se utilizan dos sensores de nivel en cada contenedor. Con base en la información proporcionada por los sensores de nivel, el SOC publica en el broker MQTT el estado de los contenedores, que puede ser: Vacío, Con Agua y Lleno. Por otro lado, en el “Contenedor 4” se almacena el agua tratada y se pueden

monitorizar diferentes parámetros físicos y químicos para analizar la calidad del agua resultante. En este prototipo se mide el valor de acidez del agua mediante el sensor de E201-C BNC, este sensor se muestra en la figura 10.



Figura 10 Sensor de pH E201-C con conector BNC.

Las bombas sumergibles de agua son conectadas mediante relevadores; mientras que los sensores de nivel y de pH se conectan de manera directa al SOC, tal como se muestra en la figura 11. El SOC es conectado inalámbricamente a un AP para tener acceso a Internet. La lectura del sensor E201-C BNC es publicada al agente EMQX en el tópico “Test/ESP32/IntoResult” para que la entidad Node-RED la pueda leer y la almacene en la base de datos.

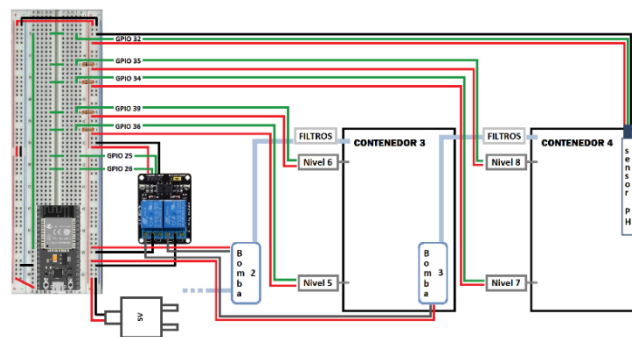


Figura 11 Diagrama de conexiones del módulo de filtrado.

- **Módulo 4 - Almacenamiento y visualización de datos.** Este módulo está constituido por varios elementos de software. El primero de ellos es Node-RED. Esta entidad sirve como herramienta de programación gráfica basada en flujos. La aplicación desarrollada con esta herramienta: i) envía y recibe datos hacia y desde el agente EMQX, ii) almacena información en la base de

datos y iii) proporciona un *dashboard* para que el usuario pueda configurar y monitorizar el sistema de tratamiento desde cualquier navegador web. Empleando el *dashboard*, el usuario puede acceder a tres interfaces en las que puede:

- ✓ Configurar de manera remota el tratamiento de agua definiendo la cantidad de polímero que se agregará al agua contaminada, y estableciendo la velocidad y tiempo de agitación, así como el tiempo de reposo, figura 12.

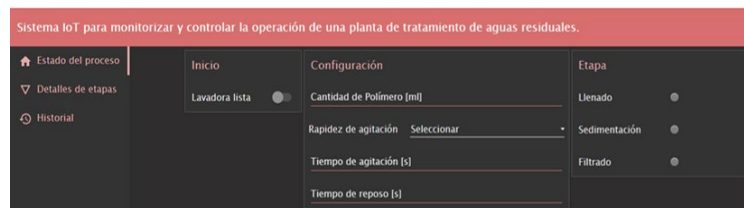


Figura 12 Interfaz para configurar parámetros y para verificar la etapa en ejecución.

- ✓ Visualizar el estado del proceso y el estado de los contenedores mediante un conjunto de indicadores visuales, figura 13.

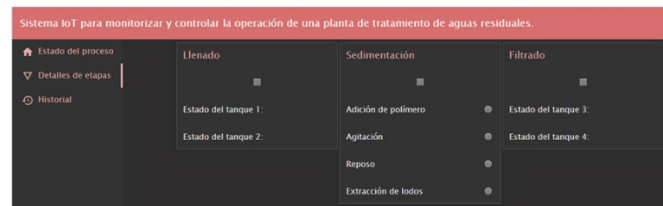


Figura 13 Interfaz para verificar las etapas del proceso y el estado de los contenedores.

- ✓ Verificar el historial de cada tratamiento de aguas que realizó el sistema y la calidad del agua resultante, esta información es leída desde la base de datos en donde se lleva registro histórico del tratamiento y de los resultados, figura 14.

La configuración usada en cada proceso, la fecha de realización y la calidad del agua resultante se almacenan en la base de datos relacional. Para que Node-RED almacene la información señalada se programó gráficamente el

flujo que se muestra en la figura 15. Este flujo recibe información del broker MQTT en los tópicos “Test/ESP32/IntoResult” (Resultados del proceso, i.e., el nivel de pH) e “Test/ESP32/IntoConfig” (La cantidad de polímero, velocidad de agitación y tiempos de agitación y reposo). La información es recibida en formato JSON y es procesada para posteriormente almacenarla en la base de datos. Esta información es mostrada en el *dashboard*, tal como se muestra en la figura 14.

Sistema IoT para monitorizar y controlar la operación de una planta de tratamiento de aguas residuales.									
Estado del proceso		Configuración				Resultados			
No. Config...	Polímero [ml]	Rapidez	Tiempo [s]	Reposo [s]	No. Co...	pH	Fecha		
1	120	Medio	56	40	1	5	2023-01-25T06:00...		
2	120	Lento	56	40	2	7	2023-01-25T06:00...		
3	120	Rapido	56	40	3	8	2023-01-25T06:00...		

Figura 14 Historial de procesos junto con su respectiva configuración y resultados.

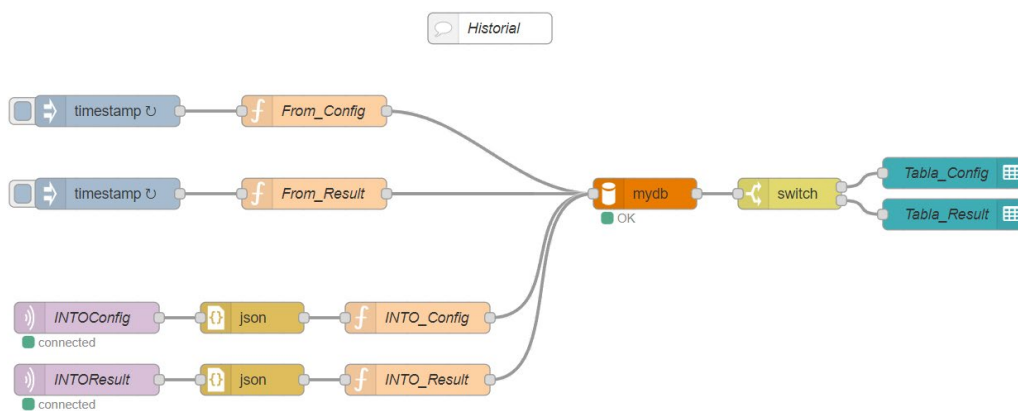


Figura 15 Programación gráfica para almacenar información en una base de datos.

Para acceder de manera remota al servidor web, implementado en Node-RED, se utilizó la API provista por la aplicación en línea *Ngrok*. Es gracias a esta API que se puede obtener un dominio *Ngrok* para acceder diversos servicios desde cualquier lugar del mundo con acceso a Internet. En este caso *Ngrok* proporciona una URL, a la cual se puede acceder desde cualquier navegador, y se utilizan técnicas de reexpedición de puertos (*port-forwarding*) para acceder de manera remota al *dashboard* diseñado con Node-RED e implementado en una PC privada.

Mecanismo para la coordinación entre módulos

Lo microcontroladores envían y reciben información desde el agente MQTT EMQX ubicado en Internet. Los agentes MQTT, conocidos comúnmente como *brokers*, son responsables de: i) aceptar suscripciones de los clientes MQTT, ii) crear tópicos, y iii) recibir y reenviar mensajes desde y hacia los clientes suscritos a cada tópico. El protocolo MQTT es un protocolo de capa de aplicación, extremadamente ligero e ideal para el IoT, y funciona bajo el modelo de comunicación *subscriber-publisher*. Los clientes MQTT se conectan con el *broker* y se suscriben a un tópico de modo tal que pueden publicar información en el tópico, y, también, recibir información que otros subscriptores publiquen en el mismo tópico. Los microcontroladores ESP32 empleados en el sistema no intercambian mensajes directamente entre ellos, sino que lo hacen empleando los servicios del *broker* EMQX. La información intercambiada entre los microcontroladores también es utilizada por el módulo de procesamiento y visualización de datos. Se configuraron tópicos en el broker para cada etapa del proceso, de modo que cada SOC publica y recibe información asociada a cada etapa y se emplean banderas para coordinar el funcionamiento del sistema. Para coordinar las 3 etapas, se utilizó el tópico "Test/ESP32/Etapa2". Como se observa en la figura 16, los 3 microcontroladores ESP32 están suscritos y publican en él el tópico "Test/ESP32/Etapa2". En este modelo de coordinación, no se ejecutan etapas concurrentemente, de manera que la bandera actúa como un *token* que activa una a una las etapas del sistema.

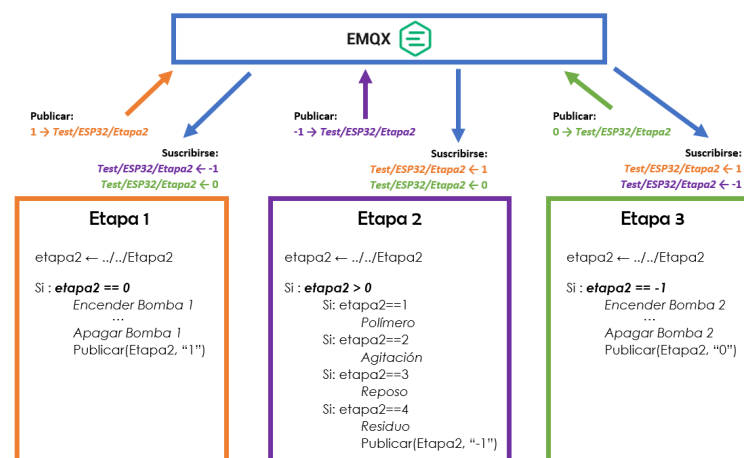


Figura 16 Mensajes MQTT para coordinar la interacción entre las tres etapas del proceso.

Cada SOC actúa como un suscriptor MQTT a diversos tópicos en los cuales publica y recibe datos. La aplicación diseñada con Node-RED también actúa como un cliente MQTT, consecuentemente la aplicación puede recibir información proveniente de los sensores y enviar parámetros de configuración a los sensores. Para ilustrar la interacción entre el agente Node-RED y los microcontroladores, en las figuras 6 y 9 se muestran el conjunto de tópicos configurados en el *broker* MQTT a los cuales está suscrito y en los que publica el agente Node-RED.

3. Resultados

El sistema IoT para configurar, monitorizar y verificar el proceso de tratamiento doméstico de aguas residuales se evalúa en un prototipo. El prototipo está constituido por diferentes contenedores plásticos, sensores y microcontroladores ESP32, tal como se aprecia en la figura 17 y cuyo objetivo es simular las condiciones en las que operaría el sistema final.



Figura 17 Diseño del prototipo de evaluación.

Cada contenedor de plástico está rotulado para su identificación, y cada etapa del proceso es controlada por microcontroladores ESP32 conectados a Internet empleando tecnología Wi-Fi. El contenedor para el polímero requiere de mayor altura ya que el polímero desciende por gravedad y requiere de fuerza suficiente para pasar por la electroválvula. Del mismo modo, el lodo de sedimentación desciende por gravedad hacia el contenedor de residuos.

Las conexiones y la circuitería del sistema se implementaron con tablillas de experimentación, tal y como se muestra en la figura 18. Después de encender el

hardware del sistema, los microcontroladores establecen conexión remota con el *broker* MQTT EMQX en la URL <http://broker.emqx.io:1883> y el sistema está listo para operar.

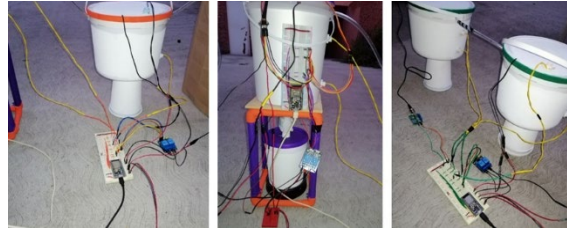


Figura 18 Conexiones de cada etapa del banco de pruebas.

Antes de comenzar el proceso de tratamiento es necesario que el usuario del sistema acceda de manera remota al servidor web donde se aloja el *dashboard*. Desde la interfaz “Estado del proceso”, el usuario primero debe configurar los parámetros del tratamiento; es decir, la *cantidad de polímero* que se debe emplear, la *rapidez de agitación*, el *tiempo de agitación* y el *tiempo de reposo*. Una vez que se han definido los parámetros del tratamiento de agua, el usuario debe habilitar la opción de inicio para que el sistema comience la Etapa de Llenado, es decir, llenar con agua contaminada el “Contenedor 1” y el “Contenedor 2”. Esta etapa se muestra en el *dashboard*, tal como se aprecia en el lado izquierdo de la figura 19. En este punto del proceso, el usuario ahora puede visualizar los detalles de cada etapa en la interfaz “Detalles de etapas”.

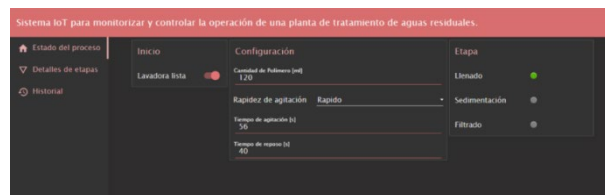


Figura 19 Interfaz para configurar el tratamiento del agua residual.

En la interfaz denominada como “Detalles de las etapas”, el usuario puede visualizar mediante diferentes indicadores visuales las fases en ejecución de cada etapa. Se debe enfatizar que todos los datos mostrados en la interfaz gráfica son

proporcionados por el *broker* MQTT en la nube. En el ejemplo que se muestra en la figura 20, en la sección denominada como “Llenado”, el usuario puede verificar los indicadores visuales que notifican cuando los contenedores 1 y 2 se llenan con agua residual, véase el lado izquierdo en la figura 20.

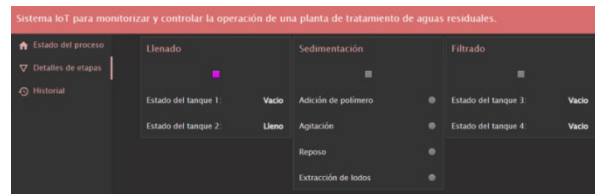


Figura 20 Interfaz donde se muestran los detalles de las fases del proceso.

Después de que “Contenedor 2” se llena, el proceso de tratamiento pasa a la “Etapa 2”, denominada como “Sedimentación”. La ejecución de cada una de las fases, denominadas como “Adición de polímero”, “Agitación”, “Reposo” y “Extracción de lodos” se indica en el *dashboard*, figura 21.

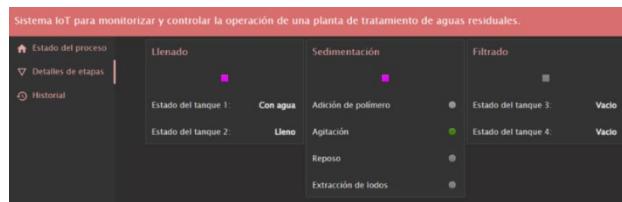


Figura 21 Interfaz para indicar las diferentes fases de la etapa de sedimentación.

Cuando la Etapa de “Sedimentación” concluye, el ESP32 de esa etapa envía la bandera al *broker* MQTT para indicar al ESP32 de la “Etapa 3” que puede comenzar el procedimiento de filtrado. En este instante, se apagan los indicadores de la Etapa de “Sedimentación” y se enciende los de la Etapa de “Filtrado”, figura 22.

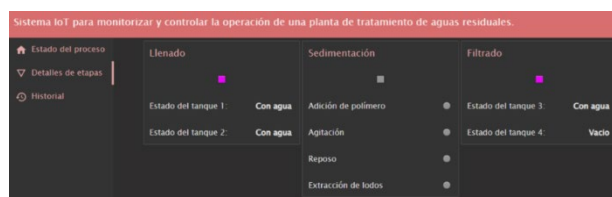


Figura 22 Interfaz donde se señalan las fases de la etapa de filtrado.

Cuando el proceso ha concluido, el sistema almacena en la base de datos los parámetros de configuración del proceso, la fecha y hora de realización del mismo, así como las propiedades químicas resultantes del agua tratada. Las propiedades del agua tratada son reportadas por sensores ubicados en el “Contenedor 4”, en esta evaluación solo se utilizó un sensor de pH; sin embargo, se pueden incorporar fácilmente más sensores al sistema. Para hacer consultas a la base de datos, el usuario puede utilizar la interfaz denominada como “Historial”. En esta interfaz se muestran los datos de los tratamientos realizados en el sistema, la configuración de cada uno de ellos, así como los resultados del proceso, esto se muestra en la figura 23. Como se aprecia en la figura, en la pestaña de configuración se muestran los parámetros definidos para la Etapa de “Sedimentación”, mientras que en la pestaña de resultados se muestra el valor de pH del agua tratada, así como la fecha y hora de cada tratamiento.

The screenshot shows a web interface titled "Sistema IoT para monitorizar y controlar la operación de una planta de tratamiento de aguas residuales". It has a dark theme and a sidebar with three main sections: "Estado del proceso", "Detalles de etapas", and "Historial". The "Historial" section is active, displaying two tables. The first table, "Configuración", lists three configurations with columns for "No. Config...", "Polímero [ml]", "Rapidez", "Tiempo [s]", and "Reposo [s]". The second table, "Resultados", lists two results with columns for "No. Co...", "pH", and "Fecha".

Sistema IoT para monitorizar y controlar la operación de una planta de tratamiento de aguas residuales.									
Configuración			Resultados						
No. Config...	Polímero [ml]	Rapidez	Tiempo [s]	Reposo [s]	No. Co...	pH	Fecha		
1	120	Medio	56	40	1	5	2023-01-25T06:00...		
2	120	Lento	56	40	1	5.5	2023-01-25T06:00...		
3	120	Rapido	56	40	3	8	2023-01-25T06:00...		
					2	7	2023-01-25T06:00...		

Figura 23 Interfaz del historial de tratamientos realizados.

4. Discusión

Los resultados de la evaluación del sistema muestran claramente los beneficios que ofrecen las tecnologías del IoT; ya que, las tareas de monitorización y control pueden realizarse de manera remota utilizando los servicios de conectividad que ofrece Internet. La solución presentada en este trabajo es económica, tiene un bajo consumo energético y requiere de un reducido número de mensajes MQTT por cada etapa del proceso de tratamiento. La base de datos usada en esta propuesta puede ser aprovechada para definir un historial de relaciones configuración-resultado. Estos datos sirven como información de soporte para poder definir los mejores parámetros de configuración en diferentes aplicaciones. Por otro lado, el uso de una entidad centralizada de comunicaciones, como lo es el *broker* MQTT, simplifica las

comunicaciones entre múltiples entidades de software, lo cual beneficia significativamente la incorporación de otras aplicaciones.

5. Conclusiones

El agua es un recurso invaluable para la humanidad, por lo que su tratamiento y reutilización es una actividad prioritaria para el desarrollo sustentable. Las tecnologías provistas por el IoT son eficientes para configurar y monitorizar el proceso de tratamiento de aguas residuales, ya que son económicas, fáciles de desplegar y flexibles. Aunado a lo anterior, las tecnologías del IoT ayudan a realizar el almacenamiento, persistencia y organización de la información.

Como trabajo a futuro se explorará la posibilidad de aumentar el número de sensores para determinar las características del agua contaminada y el agua tratada, con el objetivo de encontrar los parámetros de configuración adecuados para ejecutar el proceso de tratamiento de agua y obtener mejores resultados.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Al-Fuqaha, A., Guizani, A., Mohammadi, M., Aledhari, M., y Ayyash, M., Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, 2347-2376, 2015.
- [2] Avazov, K., Hyun, A. E., Sami S, A. A., Khaitov, A., Abdusalomov, A. B., y Cho, Y. I. Forest Fire Detection and Notification Method Based on AI and IoT Approaches. *MDPI Future Internet*, vol. 15, 2023.
- [3] Crini, G., y Lichtfouse, E. Wastewater Treatment: An Overview. *Green Adsorbents for Pollutant Removal - Environmental Chemistry for a Sustainable World*, vol. 18. Springer, 2018.
- [4] El-Sayed, H. Y., Al-Kady, M., y Siddik, Y., Management of Smart Water Treatment Plant using IoT Cloud Services. *International Conference on Smart Applications, Communications and Networking*, 2019.
- [5] Nitish, S., y Sudheer, R., IoT based Water Quality Monitoring System, *IEEE Humanitarian Technology Conference*, 1-6, 2021.

- [6] Karn, A. L., Pandya, S., y Mehbodniya, A., An integrated approach for sustainable development of wastewater treatment and management system using IoT in smart cities. *Soft Computing*, vol. 27, 5159–5175, 2023.
- [7] Martínez, R., Vela, N., Aatik, A., Murray, E., Roche, E., y Navarro, J. M., On the Use of an IoT Integrated System for Water Quality Monitoring and Management in Wastewater Treatment Plans, *MDPI Water*, vol. 12, 2020.
- [8] Meera, S., Sree, S. M., Kalpana, R. A., Manasvinii, S. R., y Valarmathi, K., IoT Based Weather Reporting System Using Arduino and Node MCU, *Smart Intelligent Computing and Communication Technology*, 2021.
- [9] Metia, S., Nguyen, H. A. D., y Ha, Q. P., IoT-Enabled Wireless Sensor Networks for Air Pollution Monitoring with Extended Fractional-Order Kalman Filtering. *MDPI Sensors*, vol. 21, 2021.
- [10] Quincozes, S., Tubino, E., y Juliano, K., MQTT Protocol: Fundamentals, Tools and Future Directions, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 9, 1439-1448, 2019.
- [11] Ranjbar, M., y Abdalla, A. H., Development of an Autonomous Remote Access Water Quality Monitoring System, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 8, 467-474, 2017.