

MQTT: protocolo de comunicación en las IoT MQTT: IoT communication protocol

L. A. Rojas-Briseño ^{a*}, O. A. Domínguez-Ramírez ^a.

^a Área Académica de Computación y Electrónica, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

En este artículo de revisión se detalla uno de los diferentes protocolos de comunicación en relación directa con las IoT y sus derivadas, así como el impacto que tiene el Internet de las Cosas en la vida cotidiana, las implicaciones de desarrollar un sistema capaz de conectarse a la red para enviar y recibir datos en tiempo real, denominado MQTT, los pro y contra de este protocolo. También se hace mención acerca de las tarjetas de desarrollo y lo versátil que puede llegar a ser el uso del mismo para la obtención de datos de un sistema remoto. Dicho escrito pretende incentivar a la población estudiantil principalmente, a implementar las IoT en sus proyectos futuros, ya que implica la contribución a la quinta revolución industrial, proyectándose potencialmente a la automatización de procesos.

Palabras Clave: IoT, Tecnología, MQTT, Microcontroladores, Redes.

Abstract

This review article details one of the different communication protocols directly related to the IoT and its derivatives, as well as the impact of the Internet of Things in everyday life, the implications of developing a system capable of connecting to the network to send and receive data in real time, called MQTT, the pros and cons of this protocol.

It also mentions the development boards and how versatile it can be used to obtain data from a remote system. This paper aims to encourage the student population mainly, to implement IoT in their future projects, as it implies the contribution to the fifth industrial revolution, potentially projecting to the automation of processes.

Keywords: IoT, Technology, MQTT, Microcontrollers, Network.

1. Introducción

Ante un mundo en constante desarrollo e innovación, es imposible estancarse empleando tecnologías antiguas o un poco fuera de desarrollo, puesto que la rapidez con la que crecen estas ciencias ha permitido diversas posibilidades en los avances tecnológicos para diferentes aspectos de la vida (Nižetić et al., 2020).

Por tanto, hoy día el emplear la mayoría de los recursos actualizados, es una herramienta al alcance de las manos de aquellos que se involucran en la innovación continua.

Actualmente la tecnología es capaz de innovar la forma en la que podemos comunicarnos con dispositivos a distancia siendo un ejemplo las implementaciones de las IoT, por sus siglas en inglés (Internet of Things), es una red de objetos físicos que están integrados ya sea con sensores, software y otras tecnologías con el fin de conectarse con otros dispositivos para el intercambio de datos a través de internet, las cuales han

revolucionado la manera en la que pueden interactuar los dispositivos con diversos sistemas, desarrollando un método de intercambio de datos eficiente, con una conectividad casi perfecta, de las cuales una gran parte de la población es capaz de tener acceso, sin embargo, no todas las personas tienen la facilidad de interactuar con dichas herramientas. Por lo tanto, surge la importancia en la mejora e implementación de estas herramientas, en donde existe la posibilidad del desarrollo empleando una cantidad de recursos relativamente mínimos, una de estas herramientas es la transmisión de mensajes a través de Message Queue Telemetry Transport (Transporte de Telemetría de Cola de Mensajes), que, aparte de pertenecer al mundo de las IoT, también se ha ido involucrado en el Internet Industrial de las Cosas (por sus siglas en inglés IIoT) que día con día crece, facilitando tareas presenciales de las personas por su versatilidad, no obstante, el integrar estas tecnologías sugieren retos, por lo que en este artículo se analizarán dichos desafíos, las áreas de oportunidad y las tendencias de emplear

*Autor para la correspondencia: ro428084@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: ro428084@uaeh.edu.mx (Luis Alberto Rojas Briseño), omar@uaeh.edu.mx (Omar Arturo Domínguez Ramírez).

Historial del manuscrito: recibido el 16/03/2025, última versión-revisada recibida el 27/05/2025, aceptado el 07/07/2025, publicado el 15/09/2025. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v13iEspecial2.14698>

este protocolo ligero de IoT con microcontroladores, que son dispositivos al alcance de la mayoría de personas.

2. Estado del arte

Avances en los distintos sectores como las comunicaciones, la microelectrónica, sensores, instrumentación, procesamiento digital de señales, datos e imágenes, ha hecho que el número de dispositivos que se conectan a internet vaya creciendo exponencialmente, dando origen al IoT, que es una red amplia de dispositivos que están interconectados, todos emplean un protocolo de comunicación específico, con el que son capaces de comunicarse entre sí y procesar datos (Pawar et al., 2023).

Con la revolución del Internet de las Cosas (IoT), el desarrollo de los sistemas se está popularizando entre los desarrolladores al igual que en el ámbito profesional. Los microcontroladores son una tecnología que se adapta muy bien al ecosistema de las IoT, ya que el desarrollarlo empleando estos chips implica un costo bajo, un consumo de energía ligero, así como el uso de arquitecturas desde 8, 16 ó 32 bits (Subero, 2018).

Los dispositivos y las tecnologías empleadas en fábricas están interconectadas alrededor del mundo, llevando a la interacción humano – máquina (H2M), así como la interacción máquina – máquina (M2M).

En otras palabras, un IoT que bien puede definirse como – una red omnipresente capaz del monitoreo y control de parámetros físicos a través de la recolección, procesamiento y eventual análisis de los datos producidos por sensores u objetos inteligentes- (Velliangiri et al., 2020).

En las últimas décadas esta herramienta ha cambiado la forma de vida del ser humano, creando ayudas sanitarias inteligentes, mecanismos en distribución de energía en entornos inteligentes, un ejemplo es la agricultura, en donde con ayuda de sensores, el agricultor es capaz de saber las necesidades de sus cosechas, así como el automatizar los procesos de riego (C. Patel & Doshi, 2020).

Como menciona C. Patel y Doshi (2020). IoT emplea una transmisión ligera con el propósito de reducir costos de comunicación por internet, al igual que emplean protocolos que simplifican y agilizan dicha comunicación, siendo MQTT (por sus siglas en inglés Transporte de Telemetría de Cola de Mensajes) el más famoso, el cual emplea TCP (Protocolo de control de transmisión, por sus siglas en inglés) como protocolo de transporte haciéndolo más confiable aún.

2.1. Internet de las Cosas.

Para los años 90, un tecnólogo perteneciente a los fundadores del MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts, por sus siglas en inglés), empezó a desarrollar lo que hoy conocemos como RFID (por sus siglas en inglés, Identificación por Radio Frecuencia), permitiendo que dispositivos físicos se conectaran mediante microchips inalámbricamente, pero no fue hasta el año de 1999 que el investigador Kevin Ashton le adjudicara el nombre con el que hoy lo conocemos, “Internet of Things”, menciona Bernstein, C et al (2021).

De acuerdo con Oracle (s.f.), para 2020 debía haber más de 10 billones de dispositivos conectados y para 2025 habrá de rebasar los 22 billones de dispositivos, al igual que en 2027,

las IoT representarán más del 51% de las conexiones móviles, menciona Ericsson Mobility (2021).

2.2. ¿Por qué son importantes las IoT?

La conectividad inalámbrica es parte fundamental en la infraestructura de las IoT, ya que, debe permitir que los dispositivos se comuniquen entre sí de manera efectiva y sin problemas a través de redes heterogéneas, sin la necesidad de ser supervisadas por el hombre, es decir, tienden a ser autónomas y con ausencia de conectividad cableada (Celebi et al., 2020).

El IoT es la herramienta perfecta para el vínculo de equipos industriales y sensores que se conectan a través de internet permitiendo un análisis de toda la adquisición de los datos generados por los sensores, que, detrás de toda esta infraestructura, las telecomunicaciones y la computación en la nube son parte fundamental del IoT, tal como lo menciona Pawar et al. (2023).

2.3. Computación en la nube.

La computación en la nube (del inglés, cloud computing) es una tendencia en el mundo tecnológico actual que evoluciona rápidamente, ya que, a diferencia de los servicios IT (por sus siglas en inglés, Tecnologías de la comunicación) actuales, esta herramienta ofrece los servicios bajo demanda, almacenamiento móvil, amplios servicios de red, seguridad mejorada, así como el acceso en cualquier lugar y cualquier momento que el operador lo desee (Yunlong & Jie, 2024).

El IoT combinado con la computación en la nube, es una de las tecnologías más extensas que existen hoy día.

IoT, relacionado con sensores, actuadores, redes y dispositivos inteligentes, están ampliamente distribuidos con la capacidad limitada de almacenamiento y procesamiento, así como problemas de seguridad y privacidad recurrentemente, haciendo que se genere una cantidad enorme de datos, ocasionando fallas en la infraestructura del internet.

Debido a lo anterior lleva a desarrollar una solución con el fin de reducir esta carga, introduciendo la computación en la nube, proporcionando servicios bajo demanda y virtuales, siendo el almacenamiento ilimitado el ejemplo principal de estas prestaciones (Tyagi & Kumar, 2020).

2.4. Protocolos de las capas de aplicación IoT.

Existen varios protocolos estandarizados para las capas de aplicación de las IoT con el fin de liderar la comunicación máquina a máquina M2M.

Dos de los protocolos más populares son CoAP (del inglés Protocolo de aplicación restringida) y MQTT.

2.4.1. Protocolo CoAP.

Definido como un protocolo de aplicación sencillo y ligero, de aplicación “solicitud – respuesta”, basado en un intercambio asincrónico de mensajes, ejecutado sobre el UDP (por sus siglas en inglés, protocolo de datagramas de usuario), el cual no ofrece ningún tipo de fiabilidad.

Este protocolo está conformado por dos nodos: el servidor CoAP, que en términos generales se puede referir a sensores o actuadores, que llegan a ser controlados a través de una API rest y el segundo, los clientes CoAP, encargados de recuperar información o solicitar alguna acción por parte del servidor (Seoane et al., 2021).

2.4.2. Protocolo MQTT.

Por otro lado, tenemos MQTT, que es un protocolo de comunicación de publicación/suscripción donde todos los nodos de comunicación están disponibles a través de un bróker, el cual acepta mensajes publicados por los dispositivos en un tópico específico, redistribuyendo ese mensaje a todos los clientes que se encuentren suscritos a dicho tópico (Palmese, et al., 2021).

2.5. Beneficios de las IoT.

El adoptar alguna IoT puede generar mayor seguridad, comodidad y eficiencia, debido a que los entornos de trabajo peligrosos pueden ser medidos y gestionados de una mejor manera, este y más beneficios se denotan en el siguiente listado (Firouzi, Farahani, et al., 2020b):

- Eficiencia: IoT permite compartir una gran cantidad de datos para después manipularlos según sea la necesidad ayudando al sistema a ser más eficiente, ejecutando decisiones inteligentes en tiempo real.
- Transparencia: IoT al digitalizar los procesos, permite que los objetos físicos siempre estén conectados.
- Automatización y control: Permite la conexión y el control digital de objetos físicos que requieren algún tipo de automatización dentro de la red, dejando de lado la intervención humana ya que al comunicarse las maquinas entre sí, conlleva a una producción más eficiente en el tiempo.
- Precisión: al existir tareas monótonas, estas se automatizan, lo que se traduce a reducción de tiempo de inactividad y de errores.

2.6. Las HIoT.

El IoT para la Salud, refiere a la conexión digital de dispositivos y objetos de detección inteligentes adquiriendo y monitoreando los datos relacionados con la atención médica, teniendo como principal objetivo mejorar la calidad con la que se brindan estos servicios por medio de esta conectividad inalámbrica.

A las HIoT también se le denomina IoMT (Internet de las Cosas Médicas, por sus siglas en inglés), las que comúnmente están implementadas en zonas geográficas reducidas y dentro de un centro médico (Chaudhari et al., 2023).

Avances en el ramo de las IoT ha permitido que dispositivos médicos realicen análisis en tiempo real, cosa que años atrás no era posible para los médicos, al igual que la computación en la nube, la cual ha permitido que la comunicación entre el paciente y el médico sea de una manera más confiable y sencilla (Pradhan et al., 2021). Lamentablemente, no todos los centros de salud cuentan con ello, por lo que es necesario tomar un plan de acción para disminuir riesgos con aquellas personas que son vulnerables a varias enfermedades.

Innovaciones tecnológicas con enfoque al área de medicina y las subáreas como la telemedicina y eHealth, se emplean para el diagnóstico de enfermedades respiratorias, dentro de las cuales se encuentran los WBAN (del inglés, Redes de Área Corporal Inalámbricas), que pueden ser no invasivos e implantados en el cuerpo para el monitoreo de alguna persona (Patiño, D. 2020).

El uso de IoMT como sistema de seguimiento de salud, proporciona observación en tiempo real a través del empleo de dispositivos inteligentes de detección de salud, Inteligencia Artificial (AI, por sus siglas en inglés), Redes de Áreas Corporales (por sus siglas en inglés, BAN) y tecnologías en la nube.

La atención a largo plazo refiere al apoyo que se les brindan a las personas mayores con alguna enfermedad crónica o tipo de discapacidad, haciendo que el costo de atención en clínicas no es económicamente sostenible. Es aquí donde las IoMT juegan un papel importante con la implementación de dispositivos de bajo costo y sensores que permitan crear una asistencia médica con el objetivo de reducir los costos de dichos cuidados, siendo el desarrollo de un robot con seguridad IoT una solución viable (Chang et al., 2022).

2.7. Las IoRT.

El Internet de las Cosas Robóticas (por sus siglas en inglés IoRT), engloba varios conceptos, como la Robótica en la nube (CR), Inteligencia Artificial (AI), Machine Learning (ML) y el IoT (Khalid, 2021).

A través de las IoRT se puede reducir la presencia de personal humano en diversas actividades, un ejemplo es la prestación de servicios médicos, transporte, marketing, abriendo un sinnúmero de oportunidades de aplicación, siendo un ejemplo las industrias manufactureras, que gracias a las diferentes mejoras en los sistemas robóticos las tareas humanas han vuelto mucho más simples como el soldar, ensamblar, inspeccionar, embalar, entre varios más.

Las IoRT se clasifican de acuerdo a su aplicación, como se muestra en la Figura 1, empleados en fábricas, zonas sociales y exteriores (Menbawy et al., 2023).

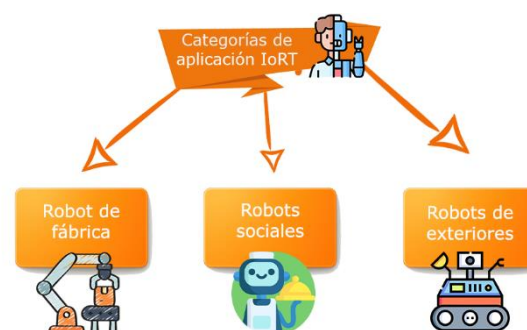


Figura 1: Clasificación de las IoRT.

3. MQTT

Creado por el Dr. Andy Stanford-Clark de IBM y Arlen Nipper de Arcom en el año de 1999 como protocolo SCADA, que más tarde en 2010 IBM lo lanzó como protocolo libre, para que en 2014 MQTT fuera estandarizado por la Organization for the Advancement of Structured Information Standards

(OASIS), desarrollando varios clientes MQTT para todos los lenguajes de programación (Batrinu. C, 2017).

Su invención se debe al uso que se le quería dar en la industria del gas y petróleo y su monitoreo, donde los ingenieros requerían un ancho de banda mínimo, así como un consumo de batería pequeño, con el fin de monitorear los oleoductos vía satélite.

De acuerdo con Amazon Web Services, es un protocolo de mensajería que emplea una serie de reglas con la finalidad de comunicar un equipo con otro. Generalmente, son sensores y/o dispositivos pertenecientes al grupo de las IoT, que muchas veces ocupan transmitir sus datos bajo parámetros poco usuales, como un ancho de banda bajo y recursos limitados.

Su esquema de envío de datos es relativamente sencillo, mensajes de dispositivo a la nube y de la nube al otro dispositivo conectado (AWS, s.f.).

Este protocolo ha ido creciendo y ha generado un importante impacto en el desarrollo de IoT, que se ha vuelto un estándar dentro de este campo de innovación, haciéndolo una herramienta bastante versátil. Este protocolo se ejecuta sobre TCP (protocolo de control de transmisión), publicación/suscripción asíncrona, disminuyendo el ancho de banda de la red, borrando por completo los requisitos del cálculo, dicho protocolo aprovecha la seguridad TLS (Seguridad de la capa de transporte), SSL (Capa de seguridad de sockets), al igual que las transacciones HTTP (Protocolo de transferencia de hipertexto) a través de internet (Mahmood, Z., 2019).

3.1 Estructura de MQTT.

MQTT consta de 3 componentes, el bróker, el editor y el suscriptor; el bróker es el encargado de controlar las publicaciones y suscripciones, el editor es el encargado de publicar la información a todos los suscriptores por medio del bróker que también es encargado de garantizar la entrega del mensaje (Jeyanthi, N et al., 2019).

Cada mensaje de MQTT consta de un encabezado fijo de 2 bytes, seguido de una variable de encabezado opcional, siendo 256MB el límite de un mensaje de payload, con 14 diferentes tipos de mensajes que MQTT permite intercambiar (12):

- Connect: que refiere a cuando algún cliente de MQTT establece conexión de red, siendo este el primer paquete de mensaje que se envía.
- Connack: es la respuesta del servidor al cliente que envía el paquete connect.
- Publish: este mensaje va de servidor a cliente o viceversa al transportar algún mensaje.
- Puback: respuesta a un Publish con QoS nivel 1.
- Pubrec: es la respuesta a un Publish con QoS nivel 2.
- Pubrel: es la respuesta de un pubrec, siendo el tercer paquete de intercambio con un QoS nivel 2.
- Pubcomo: es el cuarto y último paquete de intercambio con el nivel 2 de QoS.
- Suscribe: este paquete se envía desde el cliente hacia el servidor para crear más suscripciones.
- Suback: el servidor envía este paquete con el fin de confirmar la recepción y procesamiento de un paquete de suscripción.
- Unsubscribe: refiere al paquete enviado desde el cliente al servidor para cancelar la suscripción de algún tópico.

- Unsuback: al igual que “Suback”, confirma el paquete de cancelación del servidor al cliente.
- Pingreq: este paquete cliente – servidor, suele ser usado con el fin de conocer el estado del cliente, servidor y red, es decir, que estén activos.
- Pingresp: responde al paquete anterior indicando que el servidor está conectado.
- Disconnect: enviado desde el cliente al servidor refiriendo una desconexión del cliente.

Si bien se han empleado términos como bróker, cliente, suscriptor, entre otros, es necesario definirlos un poco más a fondo (Figura 2):

- Bróker: es el software que recibe los mensajes de los clientes y los enruta de acuerdo con las solicitudes de los suscriptores.
- Cliente: dispositivo que puede publicar y recibir mensajes.
- Tópico: es utilizado por el bróker para filtrar mensajes para cada cliente conectado.
- Suscriptor: informa al bróker que existe algún dispositivo que tiene interés en publicar y recibir mensajes publicados por algún otro cliente en ese tópico.
- Unsubcribe: dar de baja cualquier suscriptor de ese tópico, dejando en automático de recibir mensajes de dicho bróker (Batrinu. C, 2017).

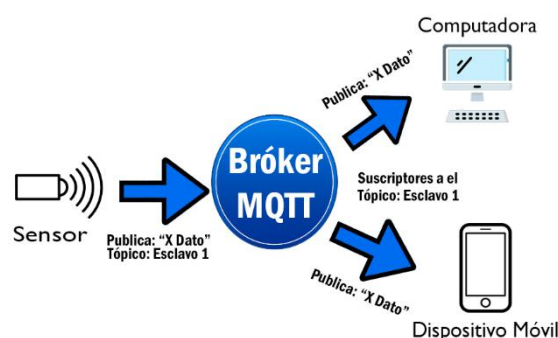


Figura 2: Estructura de MQTT.

3.2 Quality of Service (QoS).

Ante un mundo envuelto en un exponencial crecimiento de dispositivos inteligentes y el enfrentamiento de la red ante la gran cantidad de servicios conectados implica que las soluciones deben ser fácilmente escalables para garantizar la correcta implementación de las IoT, al igual que la calidad con la que se comparte la información, la cual suele representarse como la calidad de servicio QoS (Quality of Service) (Seoane et al., 2021).

Este tipo de calidad es medida en sólo 3 niveles:

- QoS 0: refiere a que es un mensaje de una sola vez, es decir, el cliente envía un mensaje, pero este no será almacenado ni respondido.
- QoS 1: “Al menos una vez”, empleado cuando se requiere una confirmación de que el mensaje llegó al destinatario, el bróker guardará el mensaje hasta que reciba una respuesta del cliente destinatario.

- QoS 2: “Solamente una vez”, cuando la aplicación del mensaje es concreta y no requiere duplicados, esta opción es la más conveniente (Batrinu. C, 2017).

4. Microcontroladores en el campo de las IoT

4.1. ¿Qué es un microcontrolador?

Son pequeños chips de circuitos integrados ensamblados en una placa de circuito impreso (por sus siglas en inglés, PCB) integrando componentes adicionales con el fin de admitir funciones tales como el acceder a los pines del chip para conectar algún otro componente externo, desde diodos emisores de luz, hasta algún tipo de sensor.

Los microcontroladores tienden a tener una capacidad de memoria disponible limitada, comando, conexiones y comúnmente, tienen una plataforma especializada con su lenguaje de programación.

Afortunadamente existen plataformas basadas en algún microcontrolador que admite una amplia gama de hardware, siendo una muy popular y disponible Arduino IDE según Bell (2016); que es una aplicación empleada para realizar programas para placas compatibles con Arduino, así mismo puede ser usada con ESP32 (Figura 3), descargando un software adicional antes de usarlo, esta plataforma soporta la versión simple del lenguaje C y C++ (Dokic, K et al., 2020).



Figura 3: Microcontrolador ESP32 (ESP32 Wi-Fi & Bluetooth SOC | Espressif Systems, s. f.).

En los últimos años, varios fabricantes de microcontroladores han estado trabajando en la implementación de ML en sus chips, teniendo que desarrollar librerías para la correcta compilación y ejecución de estos códigos (Dokic, K., 2020).

Los microcontroladores son “computadoras” independientes que se encuentran dentro de un empaquetado (comúnmente lo conocemos como chip), que, mediante una programación desarrollada, ejecuta tareas específicas, logrando así establecer una conectividad con casi cualquier cosa, desde dispositivos industriales, electrodomésticos, dispositivos portátiles, etc (Dokic, K., 2020).

4.2. ¿Por qué son flexibles los MCU con el protocolo MQTT?

MQTT al tener un enfoque ligero, tanto de tamaño, así como de ancho de banda de red, lo encamina perfectamente al uso en redes lentas e inestables con varios dispositivos

conectados, aplicándose desde sistemas embebidos, microcontroladores y computadoras de escritorio (Dai, R, et al., 2020).

El IoT permite conectarse a un gran número de dispositivos vía internet, siendo estos dispositivos un identificador único creando un ambiente inteligente, con la capacidad de intercambiar y recopilar datos. Dichos dispositivos comúnmente están conectados con microcontroladores con conectividad a internet, sensores y actuadores, siendo un ejemplo algún electrodoméstico (Kashyap, M., et al., 2018).

El protocolo MQTT se implementa para un control eficiente, sólido y coordinado de sistemas autónomos, algunos empleados en industrias del ramo de fabricación, automatización, comercio electrónico, transporte, salud, entre otras aplicaciones más. Para dicho control, es necesario un sistema centralizado con fines de seguimiento y navegación, en donde el bróker sea el encargado de comunicar el dispositivo que controle el sistema con los esclavos que van a estar monitoreando según sea el propósito, un ejemplo es NodeMCU, una placa de microcontrolador, teniendo el módulo ESP8266 de base, que cuenta con módulo Wi-Fi SoC (Sistema en un Chip) proporcionando un acceso a la red al usuario, una unidad de procesamiento LX106 y almacenamiento de 4MB, siendo una placa fácil de integrar con actuadores (Patel et al., 2023).

4.3. ESP32 y MQTT.

El microcontrolador ESP32 es un cliente MQTT que se conecta con cualquier bróker del mismo protocolo, donde se puede acceder a este panel desde cualquier parte del mundo proporcionando el acceso remoto a la información de sensores, o bien, para el control remoto de dispositivos conectados a un módulo de ESP32 (Cameron, N., 2023).

4.4. Adafruit IO: bróker MQTT.

Adafruit IO, es un sistema de visualización de datos basado en la nube, el cual requiere de conocimientos básicos en el ámbito de la programación en conjunto con el soporte de transferencia de estado representacional (REST) y API MQTT. Para realizar una conexión, se emplean librerías en el código fuente en el microcontrolador en desarrollo para conectarse, suscribirse y publicar datos, al igual que poder visualizarlos mediante la interfaz dinámica que ofrece (Bell, 2024).

5. Smart Things

El término de *Smart Thing* comúnmente se le atribuye a dispositivos IoT, sensores inteligentes, terminales IoT entre otros tipos de dispositivos relacionados a este mundo, pero, en definición un Smart Thing refiere a cualquier “objeto” con electrónica integrada, capaz de intercambiar datos a través de la red, sin la necesidad de la interacción humana en el proceso, normalmente, los Smart Things tienen una estructura basada en una unidad de procesamiento, su fuente de energía, el sistema de comunicación y los transductores.

- La unidad de procesamiento, que es la encargada de obtener los datos y procesarla en información, señales de control y funciones del Smart Thing, comúnmente, estas unidades de procesamiento son los microcontroladores debido al tamaño, flexibilidad de programación, eficiente energéticamente y de bajo costo, todo depende de las necesidades de la aplicación del sistema.
- Los transductores son los encargados de convertir una energía en otra, siendo desde energía eléctrica, de fluidos, térmica, mecánica o química. Estos transductores se dividen en actuadores y sensores, que son los encargados de conectar la unidad de procesamiento con el mundo exterior.
- El sistema de comunicación es el encargado de conectar el Smart Thing ya sea de manera inalámbrica o cableada con el mundo real utilizando una red.
- Por último, la fuente de energía, la cual todo dispositivo inteligente posee, en muchas ocasiones, el sistema de comunicación es el que más drena la batería por su constante trabajo de conectividad a la red, Dichos Smart Thing en su mayoría tienen un banco de batería limitado, por lo que es importante diseñar un sistema eficiente y de bajo consumo (Firouzi, F et al., 2020).

5.1. Sensores IoT.

Un sensor de IoT es cualquier tipo de mecanismo o herramienta, como una cámara o un monitor de calidad del aire, integrado en un dispositivo. Estos sensores recopilan información (como niveles de agua, temperatura del aire y patrones de tráfico) relacionada con los entornos en los que están desplegados y la transmiten a la nube a través de Wi-Fi, bluetooth, 5G u otra red móvil (Biba, J., 2023).

En otras palabras, un sensor que se emplea para detectar alteraciones en el mundo físico, poniendo como ejemplo la temperatura, presión, movimiento, fluidos, entre otros, obteniendo datos que posteriormente serán enviados a un sistema de monitoreo.

En el mundo de las IoT, existen varios tipos de sensores, teniendo como principales (Figura 4):

- Sensores de temperatura: es el más común dentro del campo, del cual existen algunos tipos principales de sensores: de termopar, detector de temperatura de resistencia y los termistores.
- Sensores de flujo: empleados principalmente para medir el caudal y volumen total de gases o líquidos en tuberías.
- Sensores de nivel: estos miden los niveles de cualquier líquido constantemente, siendo capaces de medir niveles en algún entorno natural e incluso en algún contenido, siendo un claro ejemplo los sensores ultrasónicos ya que no requieren tener contacto directo con el líquido a cuantificar.
- Sensores de ruido: empleados para medir la contaminación acústica y perturbaciones auditivas que puedan causar daños.
- Sensores de presión: que contiene un elemento sensible a la presión el cual determina la presión real

aplicada al sensor convirtiéndola en una señal de salida.

De igual forma, existen los Barómetros, Óhmetros, Voltímetros, Galvanómetros, sensores de luz, infrarrojos, fotoceldas, acelerómetros, sismógrafos, etc.

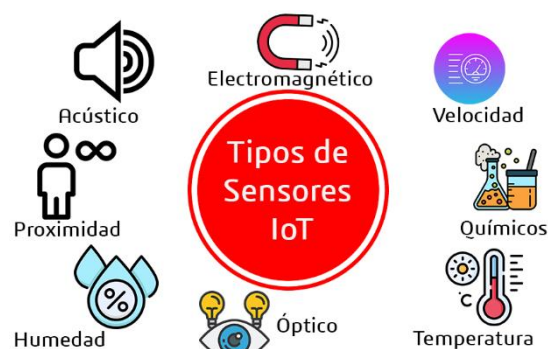


Figura 4: Clasificación de Sensores IoT.

5.2. Actuadores IoT.

Mientras que los sensores proporcionan datos, los actuadores son los responsables de controlar los sistemas, tomando los datos de energía, convirtiéndolos en movimiento, siendo de los más comunes en el ramo, los relés y los motores eléctricos (Firouzi, F et al., 2020).

Para Dai et al. (2020b), los actuadores funcionan contrario a los sensores haciendo que los impulsos eléctricos los conviertan en fenómenos visibles o acciones realizadas por ellos. En el campo de las IoT se pueden utilizar estas herramientas para supervisar y regular los equipos con base en los datos que los sensores transmitan (Figura 5).



Figura 5: Tipos de actuadores IoT.

6. IoMT: epilepsias y detección vía remota

6.1. Taquicardias.

La epilepsia es un fenómeno que afecta a 65 millones de personas en todo el mundo, incluso cuando ya existen tratamientos, alrededor de 1 millón de personas sufren convulsiones, afectando sus actividades cotidianas al igual que su calidad de vida.

La frecuencia cardíaca se puede medir de una manera más versátil en comparación con algún otro biomarcador relacionado con las convulsiones, por tanto, se ha vuelto en un parámetro crucial para la detección de convulsiones. Esto se

debe a que las señales cardiacas son de fácil registro y los algoritmos de recopilación de datos se pueden personalizar de acuerdo a las alteraciones en la frecuencia cardiaca del paciente al momento de presentar un ataque epiléptico (Eggleston et al., 2014).

6.2. Señales ECG.

La electrocardiografía (ECG) es el análisis de la actividad eléctrica del corazón a lo largo de un periodo de tiempo. El ECG se utiliza con el fin de determinar la frecuencia y regularidad de los latidos del corazón. ECG contiene 5 principales picos y valles característicos denominados P, Q, R, D y T, al igual el ECG tiene intervalos, denominados PR, QT y QRS como se muestra en la figura 6.

El intervalo PR comienza en el inicio de la onda P y termina en el complejo QRS, teniendo como valores normales entre 0.12 y 0.20s. El intervalo QT representa la duración de la sístole eléctrica empezando desde el comienzo del complejo QRS terminando en el punto final de la onda T, teniendo como valor del intervalo 0.42s o menos. El intervalo QRS, iniciando desde el principio de la onda Q y teniendo fin en el último punto de la onda S representando la duración de la despolarización ventricular (Devi & Kalaivani, 2019).

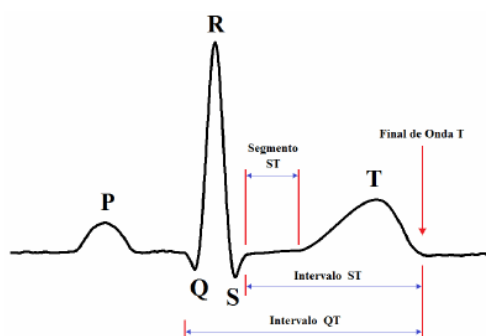


Figura 6: Fases de la señal ECG (Nelson et al., s. f.).

6.3. AD8232.

La señal ECG es obtenida mediante un controlador o librería basada en Arduino en conjunto con un sensor ECG de nombre comercial AD8232, el cual detecta la actividad eléctrica del cuerpo humano, haciéndolo por medio de 3 electrodos colocados en sectores específicos del cuerpo (brazo izquierdo, brazo derecho y pierna izquierda) con el fin de detectar el latido del corazón, convirtiendo estas vibraciones en energía eléctrica (Devi & Kalaivani, 2019).

Esta actividad eléctrica es llevada a la salida del circuito como señal analógica, que funciona a base de un amplificador de instrumentación con un filtro acondicionador, eliminando así el ruido que pudiera afectar en la señal bioeléctrica (Guevara & Hernández, 2023).

7. Implementación física

En esta sección se presenta el desarrollo de una aplicación práctica, dónde se implementará un sistema IoMT basado en

ECG, que pretende monitorear a pacientes con problemas cardiacos, específicamente a aquellos que sufren de epilepsias.

7.1. Firmware.

El cerebro del sistema, basado en código C, implementado en el entorno de Arduino IDE y ejecutado en un ESP32, capaz de conectarse a la red vía Wi-Fi y conectarse al bróker de MQTT el cual permite tener una comunicación remota entre el dispositivo y los suscriptores.

La lógica básica del programa compilado se muestra en la figura 7.

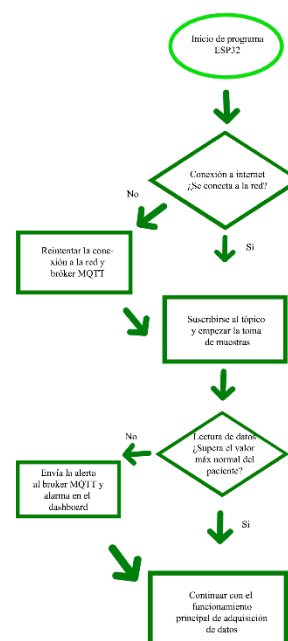


Figura 7: Diagrama de flujo del firmware en aplicación.

7.2. Hardware.

Los componentes que permiten obtener un modelo funcional están seleccionados a manera que en conjunto cumplan con un objetivo específico, cumpliendo con tareas diferentes pero que a su vez aportan al propósito final.

Empezando por el transductor, el AD8232, que se encarga de obtener la señal cardiaca mediante sus periféricos, en este caso los electrodos (que están en contacto con el paciente/usuario) que mandan la señal analógica al cerebro del sistema, digitalizándola y obteniendo los datos necesarios para ser enviados a la nube como se muestra en la Figura 8.



Figura 8: Hardware que conforma el sistema.

7.3. Envío de datos.

Sexo	Edad	Peso (Kg)	Talla (Cm)	Presión	Oxigenación	BPM (Oxímetro)	BPM (IoT)	Condición
H	26	68	168	113/70	92	68	67.95	NA
M	52	60	155	104/74	94	61	60	Trombosis venosa
H	53	78	165	110/88	93	72	71.43	NA
H	23	60	172	122/76	98	97	96.33	Resfriado
H	28	65	165	114/71	98	71	70.59	NA
M	56	68	153	138/76	96	69	67.87	IMC alto
M	23	55	157	114/80	87	64	63.9	NA
H	23	68	162	121/80	88	65	66.15	NA
H	28	75	170	125/78	95	76	75.85	NA
M	19	51	158	115/76	90	81	80.16	NA

Este envío se realiza gracias a la librería PubSubClient.h, el cual permite una conectividad con la red inalámbrica que en conjunto con la librería Adafruit sensor.h, realiza una conexión con el bróker MQTT y comienza con el intercambio de datos a través de este bróker de acceso libre, dónde se debe conocer el tópic al que se envía la información, con la finalidad de poder visualizar en un dashboard (Figura 9) los datos obtenidos en los procesos mencionados al principio de este punto.



Figura 8: Dashboard del sistema, basado en el template de Adafruit.io.

8. Ejemplo experimental

A través del desarrollo físico del sistema, es importante verificar por medio de muestras el comportamiento de la herramienta IoT.

Dicha implementación consta en tomar una pequeña muestra de la población para validar la precisión del dispositivo, dónde las muestras integran a personas de diferentes edades y algunas con condiciones de salud diversas.

Para estas muestras se emplea un algoritmo que permite obtener el ritmo cardiaco en tiempo real del paciente mediante una plataforma IoT, simultáneamente se calcula el valor RMS (Root Mean Square) con el fin de detectar anomalías en los datos adquiridos, para la cual es necesario emplear la ecuación 1.

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)}{N}} \quad (1)$$

En dónde X refiere a los latidos por minuto del paciente (BPM).

De igual manera, se monitorean los signos vitales de cada paciente, así como su BPM mediante el empleo de un oxímetro

digital, esto para obtener un valor con el cual comparar los valores adquiridos por la implementación electrónica.

En la Tabla 1, se muestran los datos obtenidos en las pruebas de campo realizadas en personas de diferentes edades.

Tomando en cuenta estos resultados, se analizará una muestra específica aleatoria de los pacientes para que, mediante una gráfica se analice más a detalle el comportamiento del sistema.

La muestra a analizar corresponde al número 9, que está conformada por una cantidad de 13 muestras (con frecuencia de 10 segundos cada una) y un registro en el oxímetro comercial de 76 latidos por minuto ilustrada en la Figura 9.

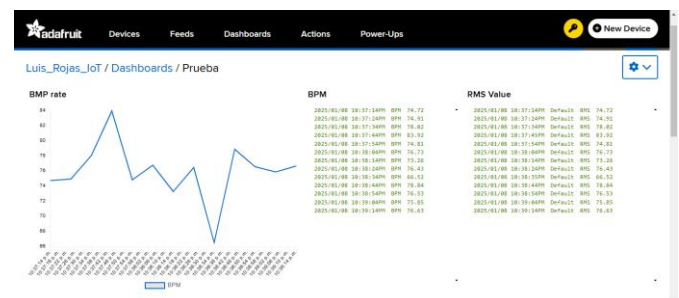


Figura 9: Recolección de datos de paciente.

Para analizar la muestra, se empleará una grafica de cajas y bigotes representada en la Figura 10, sirviendo de apoyo para la interpretación del comportamiento del dispositivo.

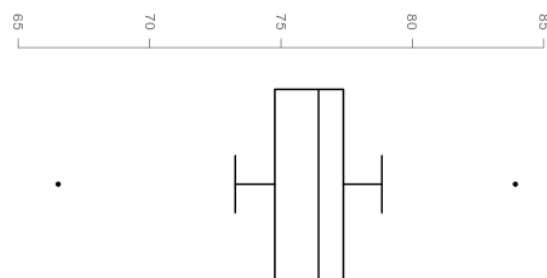


Figura 10: Gráfica de cajas y bigotes con los valores de la muestra 9.

La media para este conjunto de valores corresponde a 75.93, y la mediana al valor de 76.43, lo que sugiere una tendencia cercana a la simetría, acercándose al valor inferior en la mayoría de los datos.

La distribución se encuentra cercana al valor de la mediana, no obstante, tomando en cuenta los valores atípicos en los bigotes, sugiere mejorar la precisión al momento de empezar a tomar las muestras, procurando una disminución de ruido al manipular físicamente el MCU con el fin de disminuir el impacto que pudiese llegar a tener en la transferencia remota de datos.

9. Conclusiones

Las herramientas IoT han mejorado la manera en la que el humano interactúa con la tecnología, desde tareas aparentemente sencillas como lo puede ser un proyecto escolar, así como algunas más complejas a nivel industrial.

El implementar estas herramientas integrándolas en un objetivo común resulta tener una ventana amplia de aplicaciones, no solo en el área de la biomedicina y/o biotecnología, si no que, en cualquiera de las ramas del Internet de las Cosas teniendo fundamentos necesarios y aplicaciones eficientes para una ejecución efectiva.

La investigación realizada no sólo pretende compartir el compendio de trabajos, si no que también procura demostrar con ejemplo experimental una vía capaz de conformar dichos mecanismos inteligentes.

Referencias

- ¿Qué es el MQTT? - Explicación del protocolo MQTT - AWS. (s. f.). Amazon Web Services, Inc. <https://aws.amazon.com/es/what-is/mqtt/>
- Batrinu, C. (2017b). ESP8266 Home Automation Projects.
- Bell, C. (2016). Hardware for IOT Solutions. In: MySQL for the Internet of Things. Apress, Berkeley, CA. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-1293-6_2
- Bell, C. (2024). MQTT with Adafruit IO. En Apress eBooks (pp. 465-496). https://doi.org/10.1007/978-1-4842-9861-9_14
- Bernstein, C., Brush, K., & Gillis, A. S. (2021, 27 enero). MQTT (MQ Telemetry Transport). IoT Agenda. <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/MQTT-MQ-Telemetry-Transport#:~:text=MQTT%20protocol%20versions%20and%20history,i ndustries%20to%20remote%20enterprise%20servers>
- Biba, J. (2023, 21 febrero). 14 Types of IoT Sensors Available Today. Built In. <https://builtin.com/articles/iot-sensors>
- Cameron, N. (2023). ESP32 Formats and Communication. En Apress eBooks. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-9376-8>
- Celebi, H. B., Pitarokoilis, A., & Skoglund, M. (2020). Wireless Communication for the Industrial IoT. En Springer eBooks (pp. 57-94). https://doi.org/10.1007/978-3-030-42500-5_2
- Chang, S., Hsia, C., & Hong, W. (2022). A secured internet of robotic things (IoRT) for long-term care services in a smart building. The Journal Of Supercomputing, 79(5), 5276-5290. <https://doi.org/10.1007/s11227-022-04845-1>
- Chaudhari, A., Sarode, V., Udtewar, S., Moharkar, L., Patil, L., & Barreto, F. (2023). A Review of Artificial Intelligence for Predictive Healthcare Analytics and Healthcare IoT Applications. Lecture Notes In Networks And Systems, 555-562. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3177-4_42
- Dai, R., Kerber, E., Reuter, F., Stumm, S., & Brell-Cokcan, S. (2020). The digitization of the automated steel construction through the application of microcontrollers and MQTT. Construction Robotics, 4(3-4), 251-259. <https://doi.org/10.1007/s41693-020-00042-9>
- Dai, R., Kerber, E., Reuter, F., Stumm, S., & Brell-Cokcan, S. (2020b). The digitization of the automated steel construction through the application of microcontrollers and MQTT. Construction Robotics, 4(3-4), 251-259. <https://doi.org/10.1007/s41693-020-00042-9>

- Devi, R. L., & Kalaivani, V. (2019). Machine learning and IoT-based cardiac arrhythmia diagnosis using statistical and dynamic features of ECG. The Journal Of Supercomputing, 76(9), 6533-6544. <https://doi.org/10.1007/s11227-019-02873-y>
- Dokic, K. (2020). Microcontrollers on the Edge – Is ESP32 with Camera Ready for Machine Learning? En Lecture notes in computer science (pp. 213-220). https://doi.org/10.1007/978-3-030-51935-3_23
- Dokic, K., Radisic, B., Cobovic, M. (2020). MicroPython or Arduino C for ESP32 - Efficiency for Neural Network Edge Devices. In: Brito-Loeza, C., Espinosa-Romero, A., Martin-Gonzalez, A., Safi, A. (eds) Intelligent Computing Systems. ISICS 2020. Communications in Computer and Information Science, vol 1187. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43364-2_4
- Eggleston, K. S., Olin, B. D., & Fisher, R. S. (2014). Ictal tachycardia: The head-heart connection. Seizure, 23(7), 496-505. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2014.02.012>
- Ericsson Mobility Report, November 2021 - in Spanish. (2021, noviembre). ericsson.com. <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports>
- ESP32 Wi-Fi & Bluetooth SOC | Espressif Systems. (s. f.). <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>
- Firouzi, F., Farahani, B., & Bojnordi, M. N. (2020). The Smart “Things” in IoT. En Springer eBooks (pp. 51-95). https://doi.org/10.1007/978-3-030-30367-9_2
- Firouzi, F., Farahani, B., Weinberger, M., DePace, G., & Aliee, F. S. (2020b). IoT Fundamentals: Definitions, Architectures, Challenges, and Promises. En Springer eBooks (pp. 3-50). https://doi.org/10.1007/978-3-030-30367-9_1
- Guevara, L. H., & Hernández, K. S. P. (2023). Diseño de un prototipo modular para monitoreo de signos vitales en pacientes críticos. TECHNO REVIEW International Technology Science And Society Review /Revista Internacional de Tecnología Ciencia y Sociedad, 13(3), 1-13. <https://doi.org/10.37467/revtechno.v13.4799>
- Jeyanthi, N., Abraham, A., & Mcheick, H. (2019). Ubiquitous Computing and Computing Security of IoT. En Studies in big data. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-01566-4>
- Kashyap, M., Sharma, V., & Gupta, N. (2018). Taking MQTT and NodeMcu to IoT: Communication in Internet of Things. Procedia Computer Science, 132, 1611-1618. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.05.126>
- Khalid, S. (2021). Internet of Robotic Things: A Review. Journal Of Applied Science And Technology Trends, 2(03), 78-90. <https://doi.org/10.38094/jastt203104>
- Mahmood, Z. (2019). Security, Privacy and Trust in the IoT Environment. En Springer eBooks. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-18075-1>
- Menbawy, N. E., Ali, H. A., Saraya, M. S., Ali-Eldin, A. M. T., & Abdelsalam, M. M. (2023). Energy-efficient computation offloading using hybrid GA with PSO in internet of robotic things environment. The Journal Of Supercomputing, 79(17), 20076-20115. <https://doi.org/10.1007/s11227-023-05387-w>
- Nelson, D. J., Alvarez, A., Dugarte, E., & Álvarez, G. (s. f.). Técnicas de procesamiento de la señal ECGAR aplicadas en el prototipo DIGICARDIAC. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-04772015000100007
- Nižetić, S., Šolić, P., González-De-Artaza, D. L., & Patrono, L. (2020). Internet of Things (IoT): Opportunities, issues and challenges towards a smart and sustainable future. Journal Of Cleaner Production, 274, 122877. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122877>
- Patel, C., & Doshi, N. (2020). “A Novel MQTT Security framework In Generic IoT Model”. Procedia Computer Science, 171, 1399-1408. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.150>
- Patel, D., Dalwadi, H., Patel, H., Soni, P., Battul, Y., & Kapadia, H. (2023). Implementation of Master-Slave Communication Using MQTT Protocol. En Lecture notes in networks and systems (pp. 11-23). https://doi.org/10.1007/978-981-99-0483-9_2
- Palmese, Fabio & Longo, Edoardo & Redondi, Alessandro & Cesana, Matteo. (2021). CoAP vs. MQTT-SN: Comparison and Performance Evaluation in Publish-Subscribe Environments. 153-158. 10.1109/WF-IoT51360.2021.9595725.
- Patino Vélez, D. (2020). Diseño de un dispositivo wearable para el monitoreo de la oxigenación y ritmo cardíaco. Memorias Del Congreso Nacional De Ingeniería Biomédica, 7(1), 485-492. Recuperado a partir de <https://memoriascnib.mx/index.php/memorias/article/view/801>
- Pawar, S., Jadhav, D. B., Lokhande, M., Raskar, P., & Patil, M. (2023). Evaluation of quality of service parameters for MQTT communication in IoT application by using deep neural network. International Journal Of

- Information Technology, 16(2), 1123-1136. <https://doi.org/10.1007/s41870-023-01664-2>
- Pradhan, B., Bhattacharyya, S., & Pal, K. (2021). IoT-Based Applications in Healthcare Devices. *Journal Of Healthcare Engineering*, 2021, 1-18. <https://doi.org/10.1155/2021/6632599>
- Seoane, V., Garcia-Rubio, C., Almenares, F., & Campo, C. (2021). Performance evaluation of CoAP and MQTT with security support for IoT environments. *Computer Networks*, 197, 108338. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108338>
- Subero, A. (2018). Programming PIC Microcontrollers with XC8. En Apress eBooks. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3273-6>
- Tyagi, H., & Kumar, R. (2020). Cloud Computing for IoT. En Springer eBooks (pp. 25-41). https://doi.org/10.1007/978-3-030-37468-6_2
- Velliangiri, S., Kumar, S. A., & Karthikeyan, P. (2020). Internet of Things: Integration and Security Challenges. CRC Press.
- What is the Internet of Things (IoT)? (s. f.). Oracle. Recuperado 19 de junio de 2024, de <https://www.oracle.com/internet-of-things/what-is-iot/>
- Yunlong, F., & Jie, L. (2024). Incentive approaches for cloud computing: challenges and solutions. *Journal Of Engineering And Applied Science*, 71(1). <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00389-8>