

Medición y registro de la calidad del aire

José YOUNES¹, Esteban Daniel VOLENTINI¹, Carlos ALBACA PARAVÁN¹

¹ Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Departamento de Electricidad, Electrónica y Computación.

Resumen

La contaminación del aire se produce cuando el mismo contiene gases tóxicos, compuestos orgánicos volátiles y partículas sólidas en suspensión de 10 micrones o menos de diámetro. La Organización Mundial de la Salud (OMS) informa sobre las muertes prematuras debidas a la contaminación del aire ocurridas en el mundo. También informa sobre la relación que existe entre la concentración de los contaminantes y las enfermedades que ocurren como consecuencia. Con el advenimiento del hardware de tamaño reducido con capacidad de procesamiento y conectividad, de bajo costo y consumo, junto a los sensores de contaminantes de bajo costo y utilizando protocolos de red eficientes para la comunicación entre dispositivos que utilizan internet, es posible aplicar el concepto de *Internet of Things* (IoT) o Internet de las Cosas, que se refiere a la red de objetos físicos que se conectan a Internet usando diversas tecnologías. Este trabajo describe la implementación de un sistema IoT, para la medición de contaminantes en el aire, en los Centros de Atención Primaria de la Salud (CAPS) de la provincia de Tucumán; utilizando conectividad inalámbrica Wi-Fi para la conexión a internet.

Palabras Clave: Internet de las Cosas, Sistemas Embebidos, Aplicaciones.

Measurement and recording of air quality

Abstract

Air pollution occurs when it contains toxic gases, volatile organic compounds and suspended solid particles of 10 microns or less in diameter. The World Health Organization (WHO) reports on premature deaths due to air pollution in the world. It also reports on the relationship between the concentration of pollutants and the diseases that occur as a consequence. With the advent of small-sized hardware with processing capacity and connectivity, low cost and consumption, along with low-cost contaminant sensors and using efficient network protocols for communication between devices that use the Internet, it is possible to apply the concept of Internet of Things (IoT), which refers to the network of physical objects that connect to the Internet using various technologies. This work describes the implementation of an IoT system, for the measurement of pollutants in the air, in the Primary Health Care Centers (CAPS) in the province of Tucumán; using Wi-Fi wireless connectivity for internet connection.

Keywords: *Internet of Things, Embedded Systems, Applications.*

Introducción

La contaminación del aire se produce cuando el mismo contiene sustancias perjudiciales para la salud, como ser gases tóxicos, compuestos orgánicos volátiles y partículas sólidas en suspensión de 10 micrones o menos de diámetro.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) informa que en el año 2012, unas 7 millones de personas murieron, una de cada ocho del total de muertes en el mundo, como consecuencia de la exposición a la contaminación del aire.

Entre los principales contaminantes que se pueden encontrar en el aire y que presentan un riesgo para la salud, se encuentran los gases tóxicos como ser el dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂) y monóxido de carbono (CO), las partículas suspendidas en el aire o material particulado (MP) en suspensión con diámetro de partícula inferior a 10µm (MP10) y 2.5µm (MP2.5) y los compuestos orgánicos volátiles (VOCs).

Guías de calidad del aire de la OMS: Las guías de calidad del aire (GCA) de la OMS ofrecen recomendaciones, valores umbrales y límites para los contaminantes atmosféricos que se consideran peligrosos para la salud humana. La información incluida en la actualización mundial 2005 de las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud, se refiere a cuatro contaminantes comunes del aire: material particulado (MP), ozono (O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂) y dióxido de azufre (SO₂), como se muestra en la Tabla 1.

Además del valor guía, se definen tres objetivos intermedios (OI) para el MP. Cada OI está asociado con un nivel de mortalidad. La Tabla 2 muestra los objetivos intermedios con los promedios anuales de MP10, MP2,5 y el fundamento del nivel promedio anual elegido.

Exposiciones de corta duración: al evaluar las GCA de la OMS y los objetivos intermedios, se suele recomendar que se dé preferencia al promedio anual sobre el de 24 horas. Los

Tabla 1. Umbrales y límites para contaminantes atmosféricos, actualización mundial 2005.

Contaminante	Tiempo promedio	Valor fijado (ug/m3)
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	1 hora	200
	1 año	40
Dióxido de azufre (SO ₂)	10 minutos	500
	24 horas	20
Ozono (O ₃)	8 horas	100
Material Particulado en suspensión (PM 10)	24 horas	50
	1 año	20
Material Particulado en suspensión (PM 2.5)	24 horas	25
	1 año	10

Tabla 2. Objetivos intermedios para el material particulado. Concentraciones medias anuales.

Objetivo intermedio (OI)	MP10 (µg/m3)	MP2,5 (µg/m3)	Fundamento del nivel promedio anual elegido
OI-1	70	35	Estos niveles están asociados con un riesgo de mortalidad a largo plazo alrededor de un 15% mayor que con el nivel de las GCA.
OI-2	50	25	Además de otros beneficios para la salud, estos niveles reducen el riesgo de mortalidad prematura en un 6% aproximadamente [2-11%] en comparación con el nivel del OI-1.
OI-3	30	15	Además de otros beneficios para la salud, estos niveles reducen el riesgo de mortalidad en un 6% [2-11%] aproximadamente en comparación con el nivel del OI-2.
Guía de calidad del aire	20	10	Estos son los niveles más bajos con los cuales se ha demostrado, con más del 95% de confianza, que la mortalidad total, cardiopulmonar y por cáncer de pulmón, aumenta en respuesta a la exposición prolongada al MP2,5.

valores definidos por cada objetivo intermedio para el MP, concentraciones promedio en 24 hs, pueden verse en la Tabla 3.

Los valores definidos para el dióxido de nitrógeno, para exposiciones de corta y prolongada

duración, pueden verse en la Tabla 4.

El valor definido por el objetivo intermedio para el ozono (O3), concentraciones de ocho horas, puede verse en la Tabla 5.

Tabla 3. Objetivos intermedios para el material particulado. Concentraciones promedio en 24 horas.

Objetivo intermedio (OI)	MP10 (µg/m3)	MP2,5 (µg/m3)	Fundamento del nivel promedio en 24 hs elegido
OI-1	150	75	Basado en coeficientes de riesgo publicados en estudios multicéntricos y metaanálisis (incremento de alrededor del 5% de la mortalidad a corto plazo sobre el valor de las GCA).
OI-2	100	50	Basado en coeficientes de riesgo publicados en estudios multicéntricos y metaanálisis (incremento de alrededor del 2,5% de la mortalidad a corto plazo sobre el valor de las GCA).
OI-3	75	37,5	Basado en coeficientes de riesgo publicados en estudios multicéntricos y metaanálisis (incremento de alrededor del 1,2% de la mortalidad a corto plazo sobre el valor de las GCA).
Guía de calidad del aire (GCA)	50	25	Basado en la relación entre los niveles de MP de 24 horas y anuales.

Tabla 4. Valores definidos de dióxido de nitrógeno, para exposiciones de corta y prolongada duración.

Contaminante	Tiempo promedio	Valor fijado (ug/m3)
Dióxido de Nitrógeno (NO2)	1 hora	200
	1 año	40

Tabla 5. Objetivo intermedio para el ozono O3, concentraciones de ocho horas.

	Media máxima diaria de ocho horas (µg/m3)	Fundamento del nivel elegido para el ozono O3
Niveles altos	240	Efectos significativos en la salud; proporción sustancial de la población vulnerable afectada.
Objetivo intermedio 1 (OI-1)	160	Efectos importantes en la salud; no proporciona una protección adecuada de la salud pública. La exposición a este nivel está asociada con: <ul style="list-style-type: none"> • efectos fisiológicos e inflamatorios en los pulmones de adultos jóvenes sanos que hacen ejercicio expuestos durante periodos de 6,6 horas; • efectos en la salud de los niños (basados en diversos estudios de campamentos de verano en los que los niños estuvieron expuestos a niveles ambientales de ozono); • aumento estimado de un 3-5% de la mortalidad diaria (basado en los resultados de estudios de series cronológicas diarias).
Guía de calidad del aire (GCA)	100	Proporciona una protección adecuada de la salud pública, aunque pueden producirse algunos efectos en la salud por debajo de este nivel. La exposición a este nivel de ozono está asociada con: <ul style="list-style-type: none"> • un aumento estimado de un 1-2% de la mortalidad diaria (basado en los resultados de estudios de series cronológicas diarias); • la extrapolación a partir de estudios de laboratorio y de campo, basada en la probabilidad de que la exposición en la vida real tienda a ser repetitiva y en que se excluyen de los estudios de laboratorio las personas muy sensibles o con problemas clínicos, así como los niños; • la probabilidad de que el ozono ambiental sea un marcador para los oxidantes relacionados con él.

Los valores definidos por cada objetivo intermedio para el dióxido de azufre (SO₂), concentraciones de 24 horas y 10 minutos, pueden verse en la Tabla 6.

Marco normativo. Ley Argentina: En la República Argentina la base normativa corresponde a la Ley Nacional 20.284 del año 1973, denominada: Plan de prevención de situaciones

críticas de contaminación atmosférica. En el anexo II de la citada ley, se presentan los límites establecidos de los contaminantes, como se muestra en la Tabla 7.

Y en el mismo anexo se presentan los métodos de muestreo y de análisis para cada contaminante, como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 6. Objetivos intermedios para el dióxido de azufre SO₂, concentraciones de 24 horas y 10 minutos.

Objetivo intermedio (OI)	Promedio de 24 horas (µg/m ³)	Promedio de 10 minutos (µg/m ³)	Fundamento del nivel elegido para el dióxido de azufre SO ₂
OI-1	125	-	
OI-2	50	-	Objetivo intermedio basado en el control de las emisiones de los vehículos de motor, las emisiones industriales y/o las emisiones de la producción de energía. Éste sería para algunos países en desarrollo un objetivo razonable y viable (se podría alcanzar en pocos años), que conduciría a mejoras significativas de la salud, las cuales, a su vez, justificaría la introducción de nuevas mejoras (por ejemplo, tratar de conseguir el valor de la GCA).
Guía de calidad del aire	20	500	

Tabla 7. Límites establecidos de los contaminantes.

Contaminante (unidad)	Norma calidad del aire	Alerta	Alarma	Emergencia
CO (ppm)	10 ppm - 8 h 50 ppm - 1 h	15 ppm - 8 h 100 ppm - 1h	30 ppm - 8 h 120 ppm - 1h	50 ppm - 8 h 150 ppm - 1h
NO _x (ppm)	0,45 ppm - 1 h	0,6 ppm - 1h 0,15 ppm - 24 h	0,3 ppm - 24h	0,4 ppm - 24 h
SO ₂ (ppm)	0,03 ppm (70 µg/m ³) (promedio mensual)	0,3 ppm - 8 h	5 ppm - 1 h	10 ppm - 1h
O ₃ (y oxidantes en general) (ppm)	0,10 ppm - 1h	0,15 ppm - 1h	0,25 ppm - 1h	0,40 ppm - 1h
Partículas en Suspensión (mg/m ³)	150 µg/m ³ (promedio mensual)	No aplicable	No aplicable	Idem
Partículas Sedimentables (mg/cm ² 30 días)	1,0 mg/cm ² 30 días	Idem	Idem	Idem

Tabla 8. Métodos de muestreo y de análisis para cada contaminante.

Contaminante	Método de muestreo	Método de análisis
CO	Analizador infrarrojo modificado	Jacobs, M. B. y colaboradores. "Determinación continua de CO en aire mediante un analizador infrarrojo modificado. (Air Pollution Control Association Journal, 9:110, 1959).
NO _x	Absorción en medio líquido	Griess-Saltzman. Saltzman, B. E. "Determinación colorimétrica del NO ₂ en la atmósfera", Anal. Chem. 26:1949 (1954).
SO ₂	Absorción del gas en medio líquido	Modificación de Pate del método West-Gaeke. West, P. E. y Gaeke, G. C. "Fijación del SO ₂ como disulfotomercurate y posterior evaluación colorimétrica", Anal. Chem. 28:1816 (1956). Pate, J. B. "Interferencia de nitrilos en la determinación espectrofotométrica del SO ₂ atmosférico", Anal. Chem. 37:942 (1965).
O ₃ y oxidantes	Absorción del gas en medio líquido	Buffer neutro, yoduro de potasio. "Selección de métodos para medición de contaminantes atmosféricos", Interbranch Chemical Advisory Committee. PHS, publicación número 999, AP 11 Cincinnati, Ohio, 1965 PD-1.
Partículas en suspensión	Filtración con bombas de alto volumen	Gravimetría "Análisis normalizado de partículas en suspensión" Network 1957-61, suspensión volumen. PHS, publicación número 978, Washington D.C.
Partículas sedimentables	Captación en cilindros abiertos	Gravimetría. "Método normalizado para el análisis continuo de polvo sedimentable" (APM-1 Revisión 1). Air Pollution Measurement, Committee Air Pollutions Control Association, 16:372 (1966).

Monitoreo de la calidad del aire: Las soluciones existentes para el monitoreo de la contaminación del aire incluyen redes de estaciones convencionales de medición estáticas, constituidas por grandes estructuras alimentadas por la red eléctrica. Cuenta con analizadores caracterizados por una alta precisión y confiabilidad, así como la capacidad de medir una amplia gama de contaminantes del aire. La instalación de estaciones tradicionales de monitoreo de calidad del aire enfrenta limitaciones severas debido a los altos costos de adquisición y de mantenimiento.

Estación de monitoreo de bajo costo: La combinación de las tecnologías de la información y comunicación disponibles actualmente, junto a los desarrollos recientes de sensores de bajo costo para la medición de contaminantes presentes en el aire y de módulos electrónicos provistos de microcontroladores y conectividad, permiten el diseño e implementación de estaciones de monitoreo de calidad del aire compactas, económicas, móviles o fijas y de fácil instalación. La fuente de energía eléctrica de la estación de monitoreo proviene de una batería recargable, que mantiene su carga utilizando la energía eléctrica obtenida de un panel solar.

Objetivos

Este trabajo busca dar respuesta a la solicitud del Sistema Provincial de la Salud (SIPROSA) de la provincia de Tucumán, institución que necesita obtener en tiempo real, la medición del nivel de los contaminantes en el aire y registrar dichos niveles, en el lugar en donde se encuentra emplazado cada uno de los centros de atención de la salud. Como solución se desarrolla un sistema que utiliza sensores de bajo costo, para implementar nodos de monitoreo en cada centro de atención de la salud, y utilizando la conectividad a internet disponible en cada uno de dichos centros, se crea una red de nodos de monitoreo de calidad del aire.

Objetivos Específicos

Diseñar un sistema electrónico o nodo, con el fin de obtener los datos necesarios, para enviarlos a un servidor a través de Internet. Instalar un nodo,

equipado con sus respectivos sensores, en cada centro de atención de la salud, para de crear una red de nodos de medición de bajo costo y bajo consumo. Configurar un servidor conectado a Internet, que permita recibir y registrar en tiempo real, la información en una base de datos. Realizar el procesamiento de los datos registrados, en forma general y por cada región geográfica, con el fin de generar notificaciones y alertas.

Material y métodos

IoT: Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés), es un concepto que se refiere a objetos físicos que se conectan a Internet usando diversas tecnologías, y que tienen capacidades de conexión e interacción con el entorno, lo que les permiten tomar decisiones y comunicarse con el mundo. **Lampkin et al.** (2012).

Los dispositivos IoT son equipos electrónicos programables y conectados a internet, generalmente en forma inalámbrica, que pueden tomar datos de su entorno y enviarlos vía internet a otro dispositivo o también puede actuar o recibir órdenes, en función de los datos obtenidos. Todo depende de las instrucciones que tenga programadas.

Sensor electroquímico de gases: El sensor electroquímico de gases utiliza la propiedad de que, al reaccionar un gas con un conductor, puede ocurrir una pérdida de electrones (oxidación) liberando iones positivos o puede ganar electrones (reducción) liberando cargas negativas. El tipo de reacción química dependerá del gas y del material del conductor. Los sensores de gases tóxicos son células electroquímicas que funcionan en modo amperométrico. Generan una corriente que es linealmente proporcional al volumen fraccional del gas.

Sensor de partículas: El sensor mide la luz dispersada por partículas individuales transportadas en una corriente de aire de muestra a través de un láser. Estas mediciones se utilizan para determinar el tamaño de partícula, relacionado con la intensidad de la luz dispersada mediante una calibración basada en la teoría de dispersión de Mie y la concentración del número de partículas. Las cargas de masa de partículas: PM1 PM2.5 o PM10, se calculan a partir de los espectros de

tamaño de partículas y los datos de concentración, suponiendo una densidad de partículas y un índice de refracción (RI). El sensor se calibra utilizando partículas de látex esférico de poliestireno de un diámetro conocido y un RI conocido.

Protocolo MQTT: Fue desarrollado por IBM en el año 1999 y desde el 2014 en su versión 3.1.1 se ha convertido en un estándar del comité OASIS (Organization for the Advancement of Structured Information Standards) en su categoría IoT/M2M (Machine to Machine). **Lampkin et al.** (2012).

Es un protocolo liviano que se puede utilizar en dispositivos con pocos recursos y en redes de ancho de banda limitada y de alta latencia. Los mensajes se transmiten por TCP/IP.

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) utiliza un modelo de "Publicación/Suscripción" requiriendo el uso de un servidor intermediario central (broker) para gestionar y enrutar los mensajes entre los diferentes actores de la red, como se muestra en la figura 1.

En la conexión entre los clientes, se utiliza una topología en estrella, en la cual todos los clientes se conectan directamente a un servidor que constituye el punto central. En MQTT este servidor se denomina broker, y es la parte central de la arquitectura ya que todos los mensajes pasan por él.

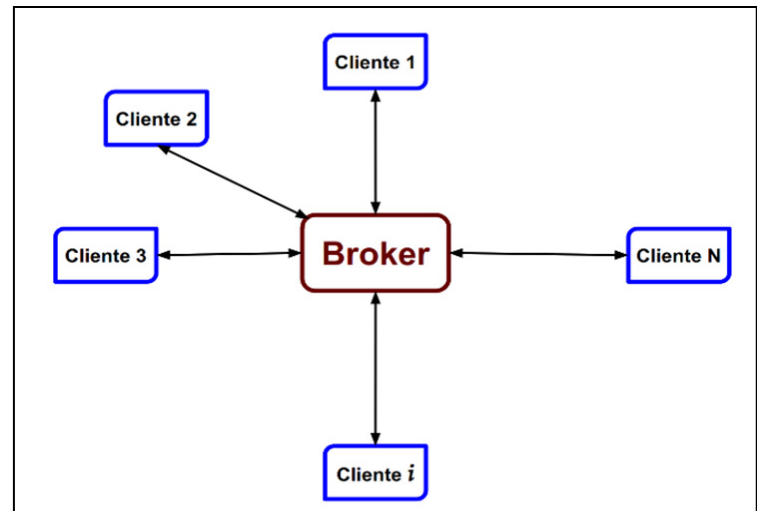


Figura 1. Arquitectura publicación/suscripción de MQTT.

El topic es el tema del mensaje donde se suscriben los clientes para recibir el mensaje que publican otros clientes. El término editor indica que ese cliente realiza publicaciones de mensajes sobre determinados temas o topic, y el término suscriptor hace referencia al cliente que está suscrito a determinados temas o topic para poder recibir los mensajes. El emisor no sabe a cuál cliente va dirigido el mensaje que publica y de forma análoga sucede con el receptor que está suscrito, no sabe cuál cliente es el emisor, esto sólo el broker lo sabe. La figura 2 muestra un ejemplo.

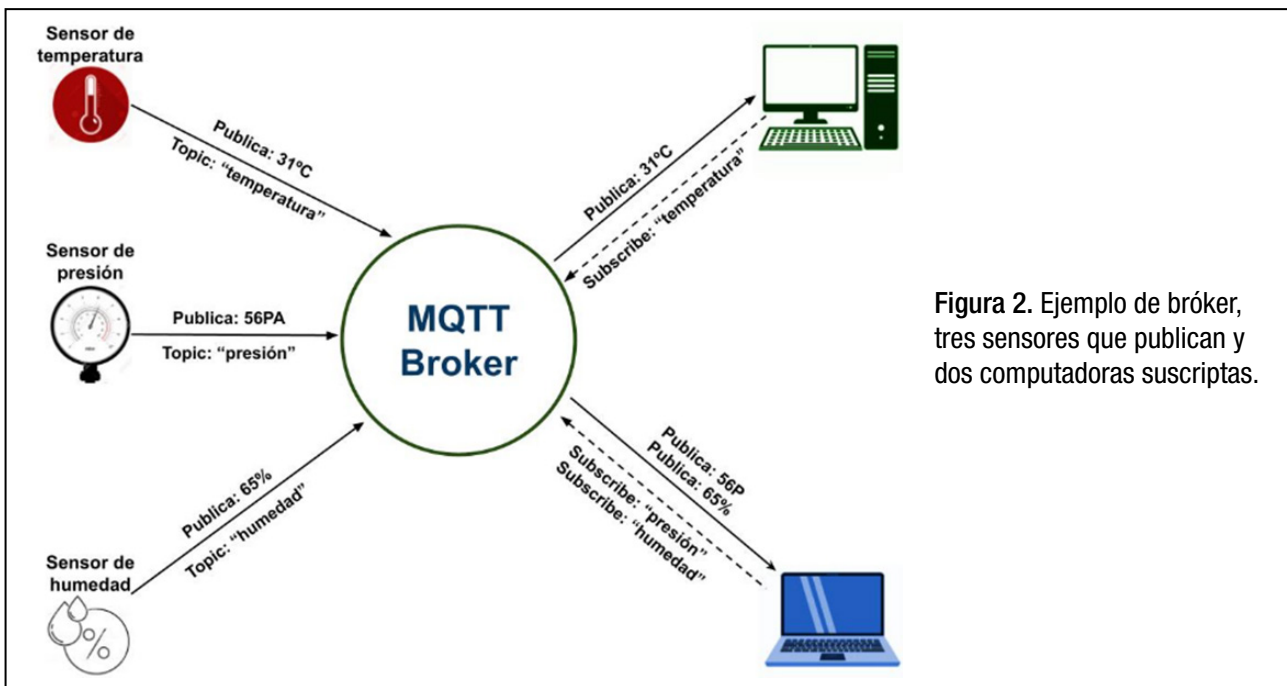


Figura 2. Ejemplo de broker, tres sensores que publican y dos computadoras suscritas.

Es decir que el broker (o intermediario) recibe todos los mensajes, los clasifica, determina quién está suscrito a cada mensaje y envía los mensajes a los clientes suscritos. El broker tiene la capacidad de hacer que los mensajes sean persistentes, guardando el mensaje hasta que se conecte el cliente al que va dirigido.

Cuando el cliente sensor de temperatura desea enviar información pública en el valor, el valor 31°C en el topic «temperatura», mientras que el cliente sensor de presión pública el valor 56PA en el topic “presion” y el cliente sensor de humedad pública el valor 65% en el topic “humedad”. Cuando un cliente desea recibir información se suscribe a uno o más topics. De esta forma recibirán el dato publicado por el sensor de temperatura solamente los clientes que se encuentren suscritos al topic “temperatura”, en este ejemplo solamente hay un cliente suscrito a este topic (es el caso de la computadora de arriba a la derecha de la figura). De igual manera, los datos del sensor de presión y de humedad los recibe el mismo cliente, dado que ese cliente se encuentra suscrito a esos dos topic (es el caso de la otra computadora en la figura). El broker es el que gestiona las conexiones y las comunicaciones de los mensajes.

El término topic se refiere a una cadena de texto que el broker utiliza para filtrar los mensajes para cada cliente conectado.

Una de las características más importantes de la arquitectura MQTT, es que los clientes o nodos no dependen unos de otros, ya que no tienen conocimiento de quién está al otro lado. Puede incluso que no haya nadie en el otro extremo. Esta característica resulta clave para la escalabilidad en los proyectos de este tipo. Un cliente MQTT es cualquier dispositivo (desde un microcontrolador hasta un servidor completo) que ejecuta una biblioteca MQTT y se conecta a un broker MQTT a través de una red.

En este trabajo se utilizó Eclipse Mosquitto, que es un agente de mensajes de código abierto que implementa el protocolo MQTT. Mosquitto es liviano y es adecuado para ser usado en dispositivos con pocos recursos hasta servidores completos.

Series de tiempo: Una serie de tiempo es una colección de datos obtenidos por mediciones de

algún evento, los cuales son reunidos sobre la misma variable, bajo las mismas condiciones a lo largo del tiempo. Al instante de tiempo en que se realiza la medición, se le suele llamar marca de tiempo o sello de tiempo.

Base de datos: El sistema de gestión de bases de datos (DBMS) es el software que interactúa con los usuarios finales, las aplicaciones y la base de datos en sí para capturar y analizar los datos.

Base de datos de series temporales: Una base de datos de series de tiempo (TSDB) es una base de datos optimizada para datos con marca de tiempo o series de tiempo. **Dunning y Friedman** (2014). Estas se construyen específicamente para manejar mediciones con marca de tiempo y están optimizadas para medir el cambio de las variables a lo largo de distintos periodos de tiempo. Tienen propiedades clave de diseño arquitectónico que las hacen muy diferentes de otras bases de datos. Las bases de datos de series temporales manejan la escala al introducir eficiencias que solo son posibles siempre y cuando los datos dependen de la variable tiempo.

En este trabajo se utilizó InfluxDB para la persistencia de los datos, es decir almacenar y mantener los datos de forma duradera y permanente. InfluxDB es un proyecto Open Source gestionado por InfluxData escrito en GO y optimizado para almacenamiento de series de datos temporales. Además, es necesario leer los datos desde Mosquitto y escribirlos en InfluxDB, para esto se utiliza el agente Telegraf.

Telegraf se encarga de recoger datos de diferentes fuentes y redistribuir los mismos a distintas aplicaciones, como pueden ser dashboards o bases de datos. Telegraf está programado en Go al igual que InfluxDB, lo que implica una buena integración entre ambas aplicaciones.

Nodos: Son los dispositivos IoT que permiten obtener las mediciones de cada contaminante y luego enviarlas vía WiFi al Access point instalado en el Centro de Atención de la salud, para poder acceder a Internet y así enviar las mediciones al servidor de aplicaciones, en donde serán registradas y procesadas.

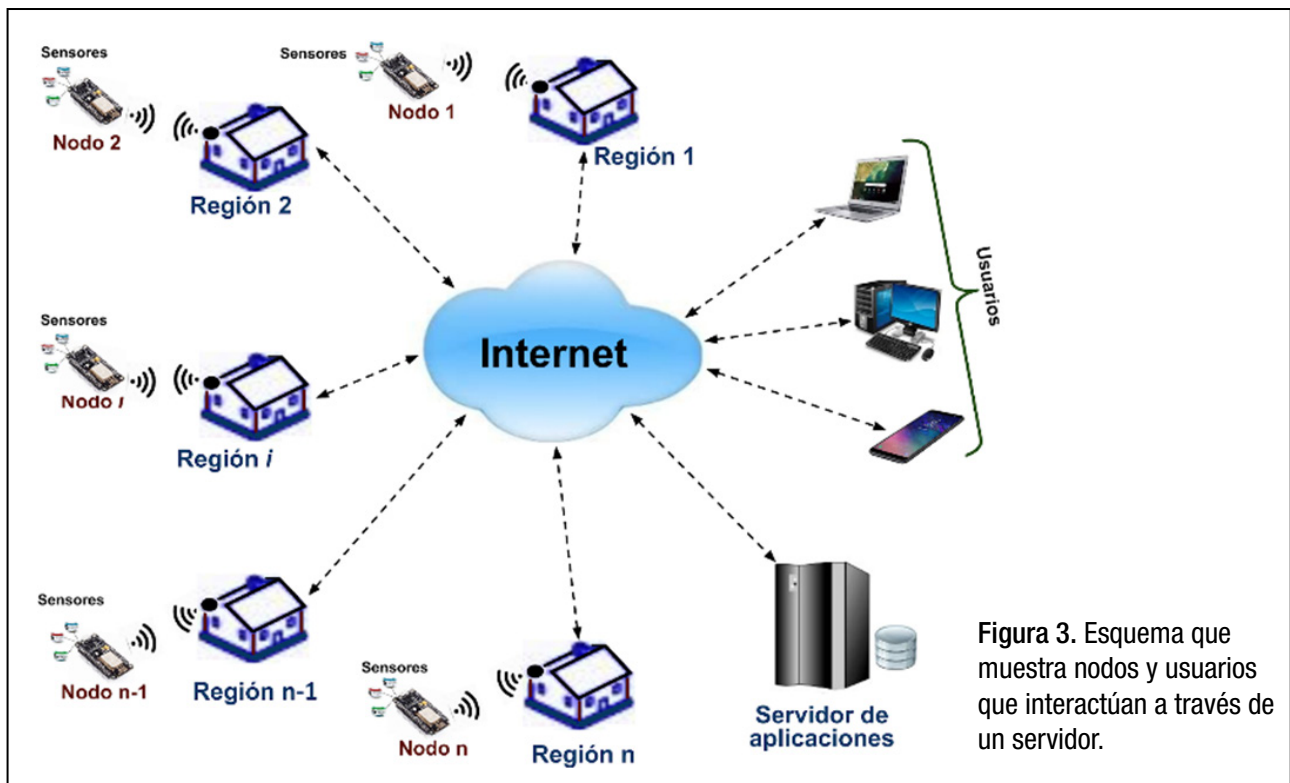


Figura 3. Esquema que muestra nodos y usuarios que interactúan a través de un servidor.

Servidor de aplicaciones: Recibe y registra los datos enviados por los nodos en una base de datos optimizada para el manejo de series de tiempo. Monitorea los niveles de contaminantes, permite el acceso de los usuarios mediante un sistema Web, para visualizar los datos obtenidos por los nodos en función del tiempo y permite el acceso remoto del usuario administrador para gestionar los recursos del servidor. La comunicación es bidireccional, cada nodo, además de enviar datos al servidor, puede recibir órdenes o información desde el servidor, por ejemplo, es posible hacer ajustes en forma remota. El esquema general se muestra en la figura 3.

Diseño del nodo: En este proyecto se utilizó la placa de desarrollo NodeMCU 8266, dicha placa se muestra en la figura 4 que está basada en el módulo ESP-12E el cual contiene un SoC (System on Chip) ESP8266 de la empresa Espressif, es un chip que integra un microcontrolador con una interfaz de comunicaciones inalámbrica WiFi con una pila TCP/IP completa.

Para la programación de la placa, se utiliza el lenguaje de programación Lua. Los programas de usuario se almacenan en la memoria flash SPI externa de 4 MB.

El módulo ESP8266 implementa TCP/IP y el protocolo completo 802.11 b/g/n WLAN MAC.

Tiene 17 pines GPIO que pueden asignarse a varias funciones mediante la programación de los registros apropiados.

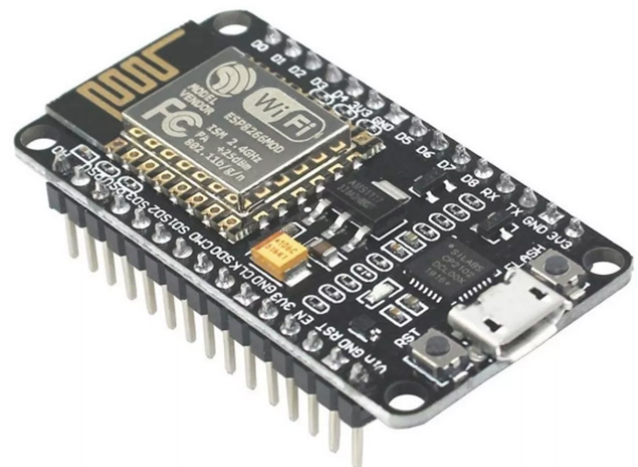


Figura 4. Placa NodeMCU 8266 V2.

Interfaces de comunicación utilizadas: La interfaz SPI (Serial Peripheral Interface) es un protocolo de comunicación síncrono utilizado para la transferencia de datos entre dispositivos electrónicos.

La comunicación SPI se realiza mediante una línea de reloj (SCLK), más dos líneas de datos: MOSI (Master Out Slave In) y MISO (Master In Slave Out) y una línea adicional llamada SS (Slave Select) para seleccionar el dispositivo con el que se desea comunicar.

El funcionamiento de la interfaz SPI implica que el maestro envía datos al esclavo a través de la línea MOSI, mientras que el esclavo envía datos al maestro a través de la línea MISO. La comunicación se sincroniza mediante la línea de reloj SCLK.

En este trabajo se utiliza SPI para la comunicación de la placa NodeMCU (maestro) con el sensor de partículas (esclavo).

La interfaz I2C (Inter-Integrated Circuit) es un estándar de comunicación serial utilizado para la transferencia de datos entre dispositivos electrónicos. Esta interfaz utiliza solo dos líneas de comunicación: una línea de datos (SDA) y una línea de reloj (SCL). Permite la comunicación entre un “maestro” y uno o varios “esclavos”. El maestro inicia y controla la transferencia de datos, mientras que los esclavos responden a las solicitudes del maestro. La interfaz I2C admite múltiples dispositivos conectados en el mismo bus, cada uno con una dirección única.

En este trabajo se utiliza I2C para la comunicación de la placa NodeMCU (maestro) con cada uno de los sensores de gases tóxicos o con el sensor de temperatura, presión y humedad (esclavos).

Sensores utilizados: El objetivo del proyecto es medir la calidad del aire usando sensores de bajo costo para determinar las concentraciones de los

contaminantes. Dichos contaminantes son: monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃) y el material particulado de 2,5 micras (PM_{2.5}) y 10 micras (PM₁₀).

Para medir dichos contaminantes, tomando como criterio la selectividad, sensibilidad, estabilidad, precisión y la información disponible de cada sensor, se eligieron los sensores electroquímicos de gases y el sensor óptico de partículas marca Alphasense.

Además, se debe tener en cuenta los efectos de la temperatura, presión y humedad, porque pueden influir en las propiedades químicas y la conductividad de los electrodos y materiales utilizados en los sensores. Por lo tanto, dichas variables pueden generar alteraciones en las mediciones obtenidas.

Es importante medir la temperatura, presión y humedad para ajustar las mediciones de los contaminantes con estas variables. Este ajuste se consigue utilizando un algoritmo de compensación, que tiene en cuenta la temperatura, presión, humedad y los datos específicos para las correcciones que provee el fabricante de los sensores.

Para medir estas variables, se utiliza un sensor de temperatura, presión y humedad.

Sensores electroquímicos de gases: Los sensores electroquímicos de dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂) y monóxido de carbono (CO) utilizan una celda electroquímica compuesta por un electrodo de trabajo, un electrodo de referencia y un contraelectrodo. Cada sensor está conectado a una placa de sensor individual o ISB (Individual Sensor Board) que provee una tensión que es proporcional a la concentración de gas. Los sensores de gases utilizados, de cuatro electrodos se muestran en la figura 5.



Figura 5. Sensores Alphasense de cuatro electrodos.

Placa de sensor individual (ISB): El sensor de gas produce una corriente de salida proporcional a la concentración de gas. Se requiere un convertidor de corriente a voltaje, también conocido como amplificador de transimpedancia, para convertir las pequeñas corrientes de la celda electroquímica en un voltaje útil para la medición.

La placa de sensor individual está diseñada para usarse con la familia de sensores de gas de cuatro electrodos B4. La figura 6 muestra dicha placa.

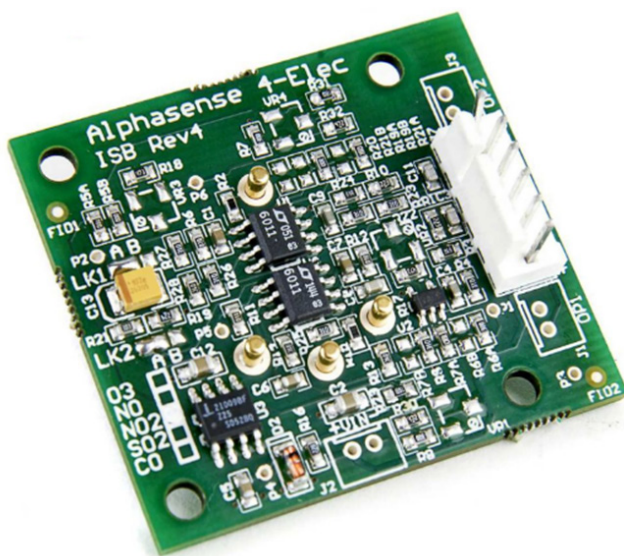


Figura 6. Placa de sensor individual ISB.

La placa contiene un circuito de control electrónico llamado potenciostato que se muestra en la figura 7, que utiliza el electrodo de referencia para mantener un potencial fijo en el electrodo de trabajo. Además, el circuito debe mantener dichos electrodos al mismo potencial.

El contraelectrodo completa el circuito con el electrodo de trabajo.

El electrodo de trabajo reacciona al gas objetivo, ya sea oxidando o reduciendo el gas, lo que da como resultado una corriente proporcional a la concentración de gas.

El ISB está configurado para sensores específicos: NO, NO₂, O₃ y CO / H₂S / SO₂. Cada ISB está diseñado para cada tipo de gas a medir con los sensores B4.

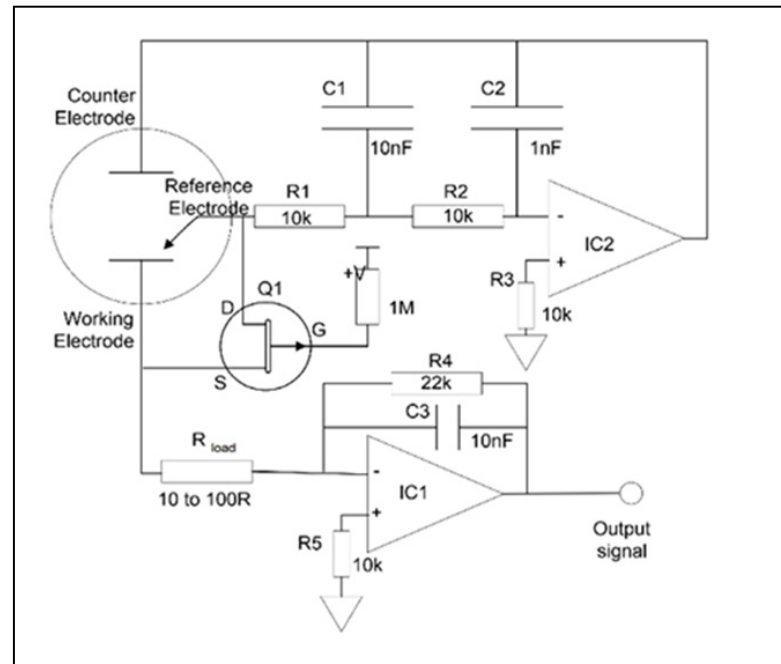


Figura 7. Circuito electrónico del potenciostato.

Conversor A/D: Dado que la interfaz I2C trabaja con señales digitales, se hace necesario utilizar un convertidor analógico a digital (ADC) entre la salida de la placa del sensor de gas y la placa de desarrollo. La figura 8 muestra un esquema simplificado de la comunicación de los sensores, placas ISB, convertidores ADC y la placa de desarrollo.

Para la conversión A/D se usó el convertidor delta-sigma MCP3424, de bajo nivel de ruido con entradas diferenciales, como se muestra en la figura 9.

El MCP3424 realiza conversiones a velocidades de hasta 240 muestras por segundo, según la configuración de bits controlable por el usuario utilizando la interfaz serial compatible con I2C de dos hilos. La dirección I2C es configurable por el usuario con dos pines de selección de dirección.

El MCP3424 es un convertidor A/D delta-sigma de alta precisión y bajo nivel de ruido de cuatro canales con entradas diferenciales y hasta 18 bits de resolución. El dispositivo utiliza una interfaz serial compatible con I2C de dos cables.

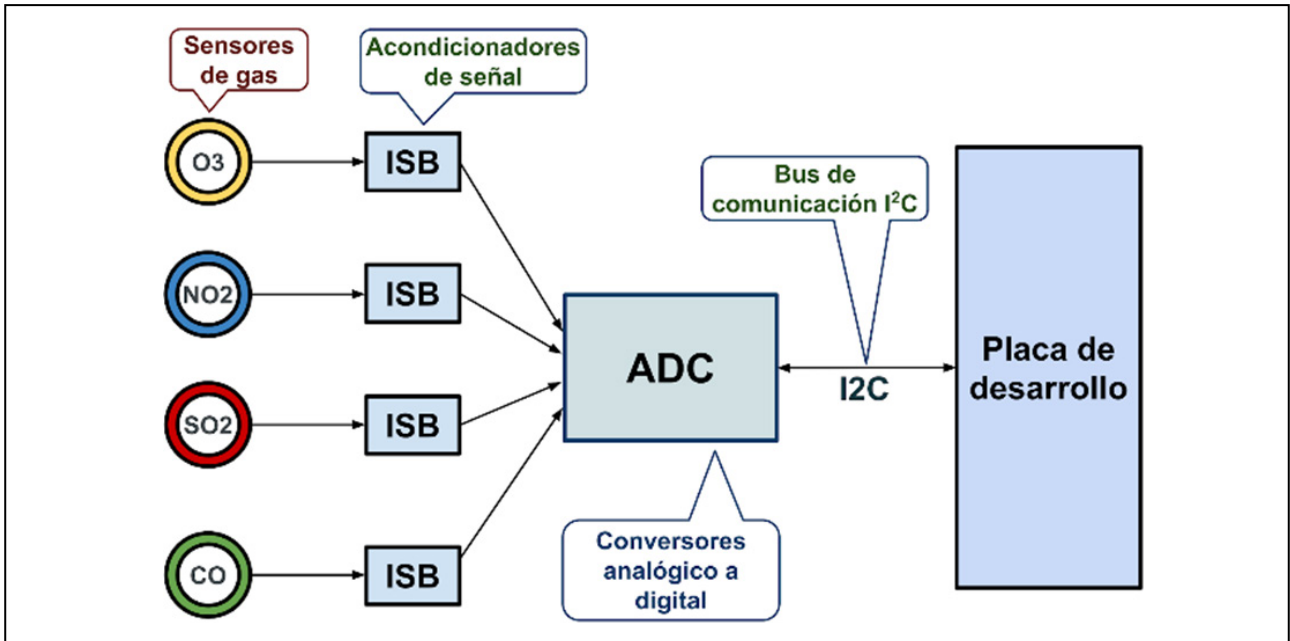


Figura 8. Esquema simplificado de la comunicación de los sensores con la placa.

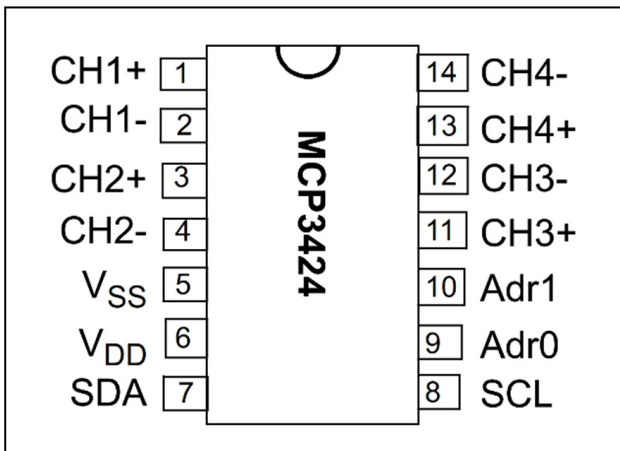


Figura 9. Conversor A/D de 4 canales con entradas diferenciales.

Sensor de partículas: El sensor de partículas utilizado es un Alphasense OPC-N3, como se muestra en la figura 10.

En dicho sensor la alimentación y la comunicación de datos se proporcionan a través del zócalo SPI.

Sensor de humedad, temperatura y presión: Para medir la humedad, la temperatura y la presión se emplea el sensor BME/BMP280 de Bosch, que se muestra en la figura 11, es un sensor integrado con bajo consumo de energía.



Figura 10. Sensor de partículas Alphasense OPC-N3.



Figura 11. Sensor de humedad, presión y temperatura BME/BMP280.

Este módulo contiene un sensor ambiental fabricado por Bosch, que utiliza la comunicación I2C.

Las mediciones de la humedad, la temperatura y la presión se utilizan para ajustar las mediciones de los contaminantes.

Conexión de los sensores: El convertor analógico digital MCP3424 realiza internamente el multiplexado de las señales analógicas existentes a la salida de cada ISB, utilizados en los sensores de gases. La salida del convertor A/D utiliza la comunicación I2C, esta salida está conectada al bus I2C de la placa NodeMCU. Además, se utiliza el mismo bus I2C para la comunicación con el sensor BME/BMP280.

En la figura 12 se muestra un esquema simplificado de la conexión del bus I2C de la placa NodeMCU con la salida del convertor A/D y la salida del sensor BME/BMP280. El bus I2C permite que se conecte al mismo, más de un dispositivo, siempre y cuando posean direcciones distintas.

El sensor de partículas utiliza la interfaz SPI para la comunicación, la salida de este sensor está conectado con el bus SPI de la placa de desarrollo NodeMCU, la figura 13 muestra un esquema simplificado del bus SPI con el sensor de partículas.

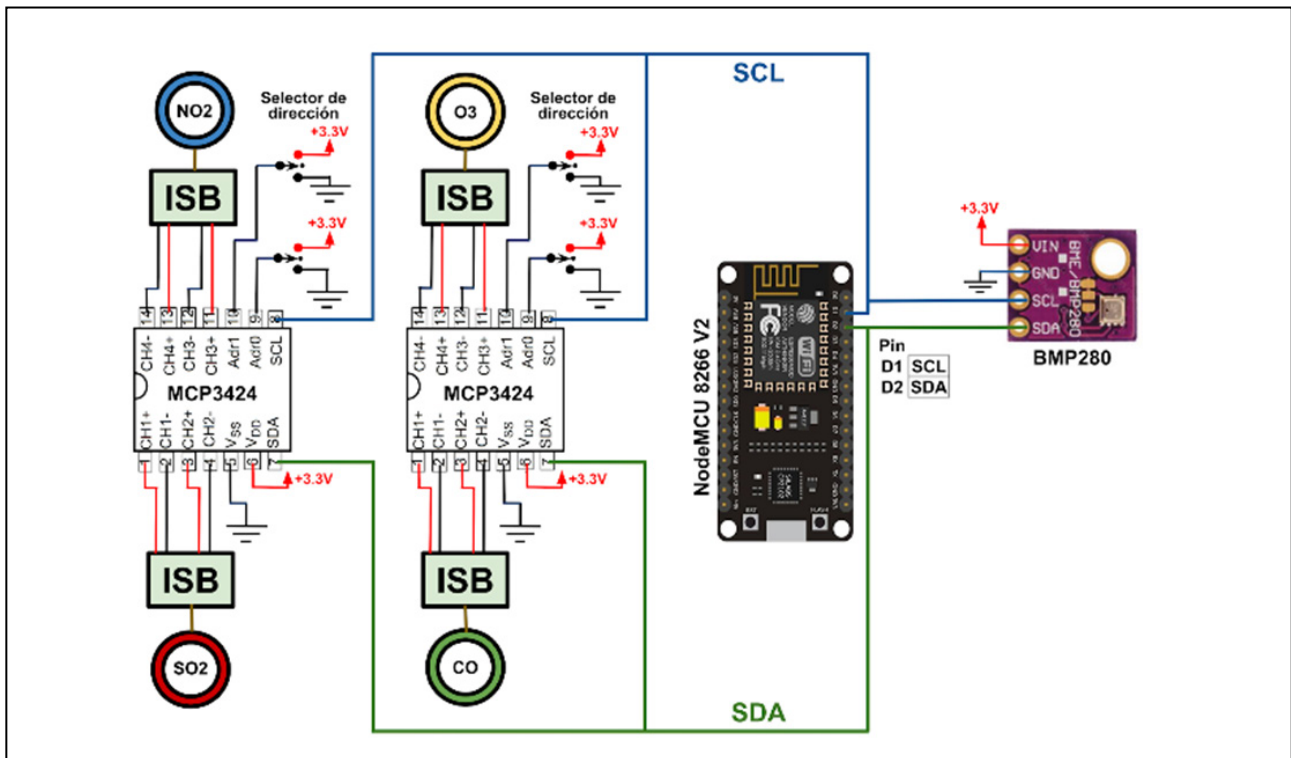


Figura 12. Esquema simplificado, uso del bus I2C con tres dispositivos.

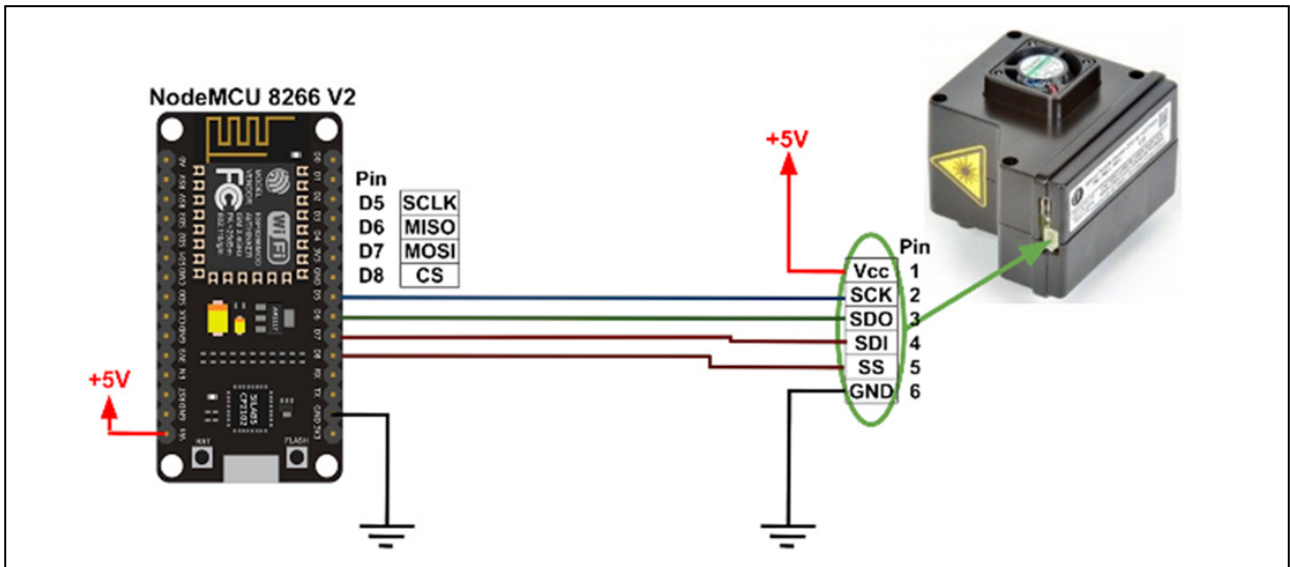


Figura 13. Esquema simplificado, uso del bus SPI con un dispositivo.

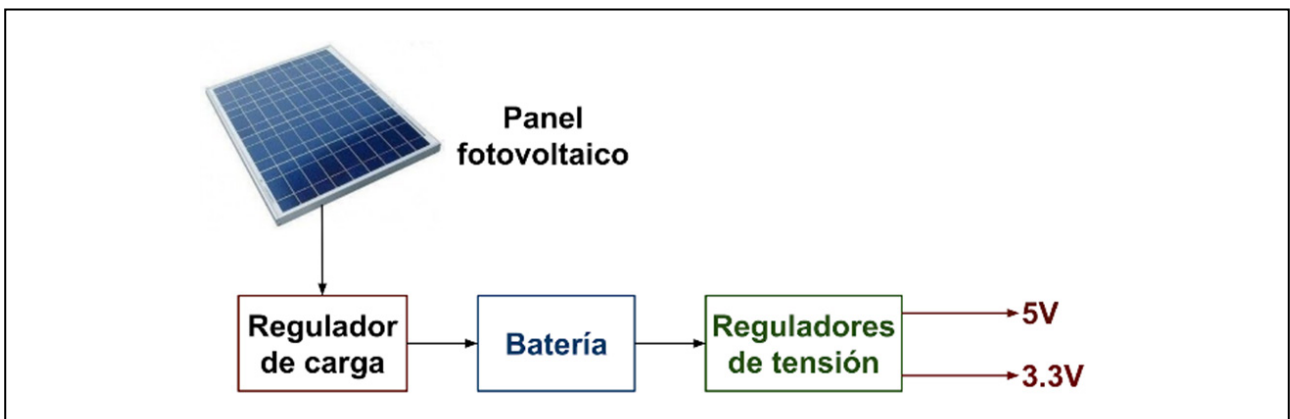


Figura 14. Esquema simplificado, panel fotovoltaico, regulador de carga, batería y reguladores reductores de tensión.

Fuente de energía: La energía eléctrica la provee una batería de 12V 7Ah, esta batería se recarga usando la energía obtenida de un panel fotovoltaico.

Se utilizó un panel fotovoltaico de 5W de potencia, la salida del panel está conectado a un regulador de carga que mantiene la carga de la batería y además provee la tensión de 12V al circuito. Algunas etapas del circuito necesitan tensiones de 5V y otras necesitan 3.3V, por lo tanto, se necesita reducir la tensión de manera eficiente, utilizando reguladores reductores de tensión, la figura 14 muestra un esquema simplificado del panel fotovoltaico, regulador de carga, batería y reguladores reductores de tensión.

Para obtener las tensiones de 5V y de 3.3V, se utilizaron dos reguladores reductores de tensión. La figura 15 muestra un regulador reductor eficiente de tensión.



Figura 15. Regulador reductor eficiente de tensión.

Seguridad del sistema: La arquitectura propuesta contiene las siguientes funciones: Autenticación y autorización, los dispositivos deben autenticarse periódicamente, de manera que se garantice la recepción de datos solamente de dispositivos confiables.

Validación de los datos, dichos datos pueden estar alterados, ya sea por errores o por ataques.

Control de acceso, ya sea a datos, dispositivos, perfiles de usuarios, etc.

Cifrado, considerar el uso del cifrado para comunicaciones seguras.

Autenticación de usuarios, existe una solicitud de autenticación para los usuarios de las aplicaciones.

Alarmas y notificaciones, permite enviar una alarma o aviso cuando un parámetro supera o cae por debajo de un determinado valor.

Resultados

Cada nodo contiene principalmente una placa de desarrollo que posee conectividad, que le permite acceder a internet usando la conectividad Wi-Fi del Centro Asistencial de la Salud.

Los nodos son los encargados de medir el nivel de los contaminantes en el aire, por medio de los sensores. El software que ejecuta la placa está configurado como cliente MQTT, para esto tiene instalada la biblioteca correspondiente que proporciona un cliente para enviar mensajes simples de publicación/suscripción a un servidor MQTT.

Cada nodo accede a internet cumpliendo el rol de publicador accediendo a los servicios de publicación/suscripción del broker ubicado en el servidor en donde se encuentra instalado MQTT Mosquitto.

Los nodos están identificados de manera unívoca de forma tal que cuando converjan los datos de los dispositivos a la base de datos, éstos podrán ser reconocibles.

Dichos nodos están interconectados a un servidor por medio de internet. Utilizando dicho servidor se obtiene la información del nivel de los

contaminantes en cada ubicación, como así también permite el monitoreo y la configuración de alarmas para recibir notificaciones vía email.

Servidor de aplicaciones: Es el encargado de recibir, almacenar y procesar los datos de los nodos, y permite el acceso de los usuarios o clientes a la información.

En este trabajo se utilizó el broker MQTT Mosquitto, es un broker desarrollado como código abierto por Eclipse, ampliamente utilizado debido a su ligereza frente a otras alternativas. El broker escucha los mensajes a través de los puertos 1883 (por defecto) y 8883 (seguro).

Para leer los datos desde Mosquitto y enviarlos al dashboard o a la base de datos, se utilizó Telegraf.

Para el almacenamiento de datos se utilizó la base de datos no relacional InfluxDB. optimizada para almacenamiento de series de tiempo.

La comunicación entre los nodos y el servidor es bidireccional, es decir que los nodos pueden enviar y recibir mensajes, y cada nodo está configurado para saber a qué tema suscribirse al conectarse y a qué función llamar cuando llega un mensaje sobre ese tema.

Una aplicación práctica de esta funcionalidad es la capacidad de configurar ciertos parámetros de todos los nodos de forma remota o individualmente desde el lado del usuario; por ejemplo, se puede cambiar la frecuencia de muestreo para todos los nodos o individualmente para un nodo específico.

Dashboard: Grafana es un visualizador de series temporales de datos que permite el uso de gráficos totalmente interactivos y editables, así como un sistema de alertas fácilmente configurables desde la interfaz gráfica de usuario.

Otra de las utilidades que posee esta plataforma es un eficiente sistema de gestión de usuarios, mediante grupos y roles con distintos permisos.

Alarmas y notificaciones: El soporte de alarmas proporcionado por Grafana permite, por ejemplo, enviar una alarma o aviso cuando un parámetro supera o cae por debajo de un determinado valor. Estas alertas se pueden configurar a través de una interfaz gráfica de usuario y permiten enviar

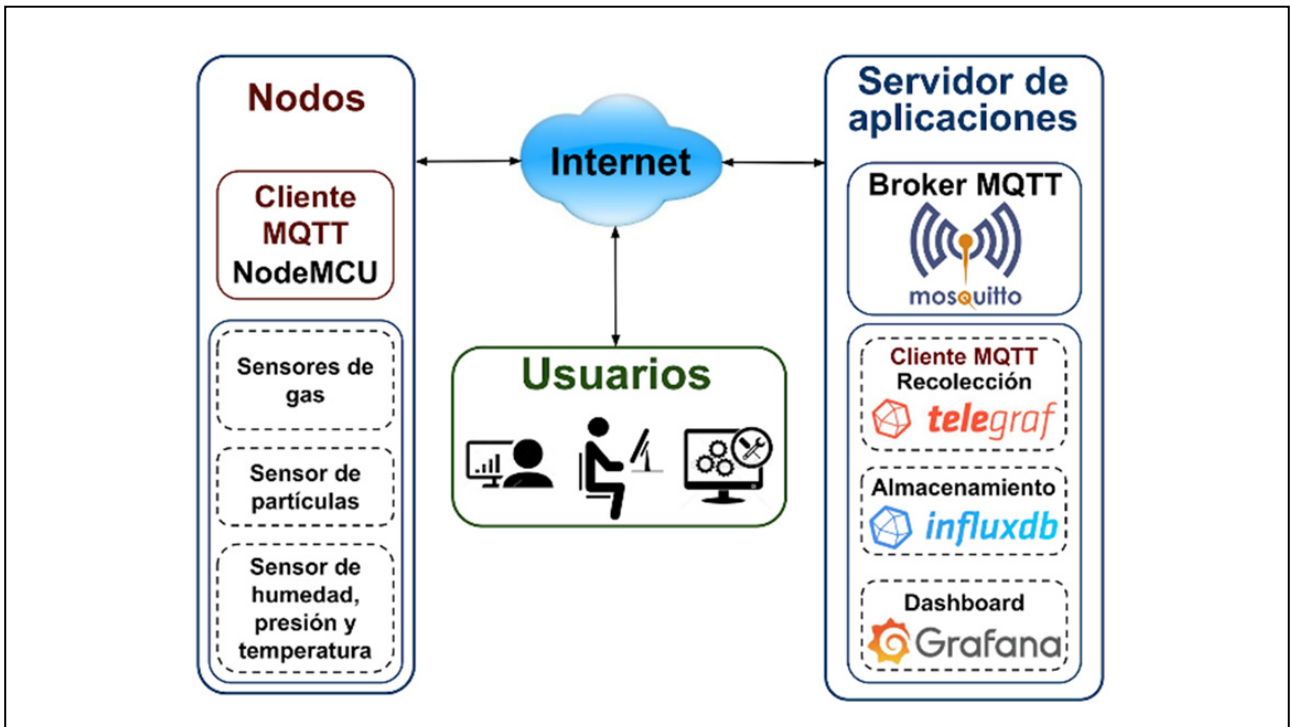


Figura 16. Esquema simplificado de los componentes del sistema propuesto.

notificaciones por correo electrónico y también a través de otras plataformas como Slack o PagerDuty.

Servidor de aplicaciones: la instalación del sistema operativo y de las aplicaciones se realizó en una máquina virtual a la que se puede acceder desde una dirección determinada. En dicha máquina virtual se instaló un sistema operativo basado en Linux. La figura 16 muestra un esquema simplificado de los componentes del sistema propuesto.

Conclusiones

A la fecha se armó un nodo que está en fase de pruebas y en función de eso se seguirá con la producción de más dispositivos de acuerdo a las necesidades del SIPROSA.

Dicho nodo se encuentra en funcionamiento en el CAPS Los Bulacio, departamento Cruz Alta, Tucumán.

La figura 17 muestra el gabinete a prueba de lluvias que contiene la batería, el regulador de carga, los reguladores de tensión, la placa principal y los sensores

con sus respectivos ISB conectados a dicha placa. Hay 6 orificios en la parte inferior del gabinete, cada sensor está ubicado encima de un orificio, por lo que quedan expuestos al aire exterior.

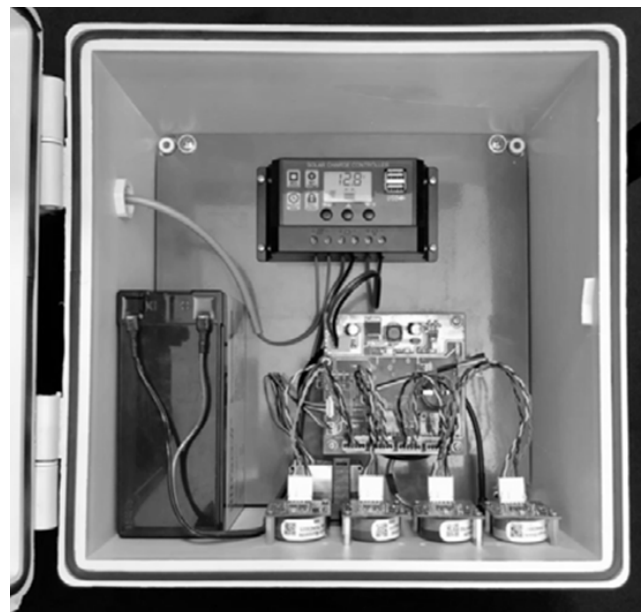


Figura 17. Gabinete a prueba de lluvias que contiene la batería, el regulador de carga, la placa principal y los sensores conectados a dicha placa

La figura 18 muestra el conjunto formado por el panel solar sujetado al gabinete a prueba de lluvias.

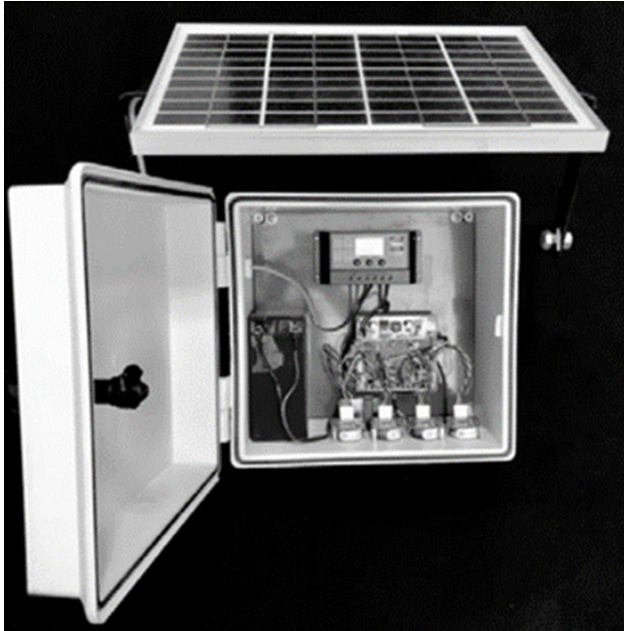


Figura 18. Conjunto panel solar y gabinete a prueba de lluvias.

La figura 19 muestra el conjunto sujetado al mástil que pertenece al CAPS Los Bulacio.



Figura 19. Conjunto panel solar y gabinete sujetado al mástil del CAPS los Bulacio.

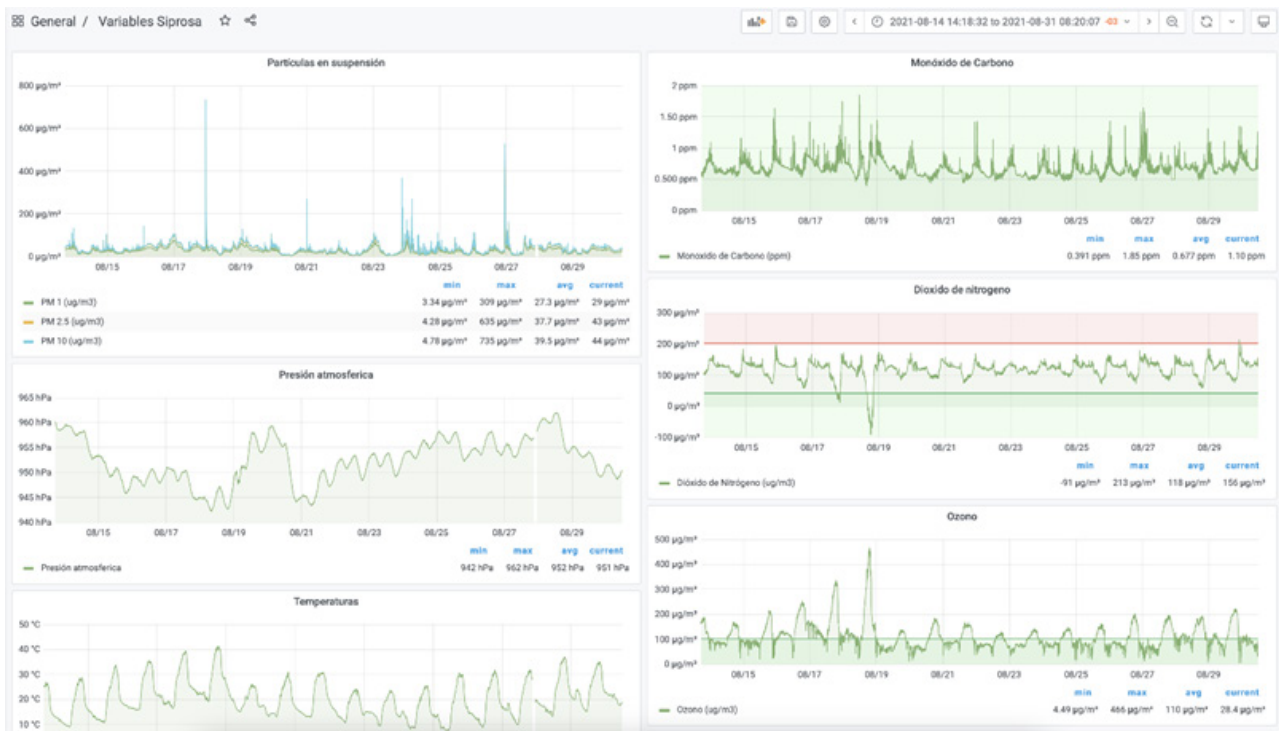


Figura 20. Imagen que brinda información de las mediciones provenientes del nodo.

La figura 20 muestra una imagen generada por el visualizador Grafana, que brinda información de las mediciones provenientes del nodo. El sistema desarrollado es fácilmente escalable ya que se

puede ampliar el número de nodos sensores, con el único límite de las direcciones IPs disponibles en la red, puesto que se puede reutilizar el mismo código para programar todos los controladores.

Bibliografía

T. Dunning, E. Friedman. (2014) *Time Series Databases: New Ways to Store and Access Data*, O'Reilly Media, EEUU.

V. Lampkin, W. T. Leong, L. Olivera, S. Rawat, N. Subrahmanyam, R. Xiang. (2012) *Building Smarter Planet Solutions with MQTT and IBM WebSphere MQ Telemetry*, IBM Redbooks, EEUU.

Alphasense Sensors. (diciembre 2019)

<http://www.alphasense.com/index.php/air/>

Conociendo MQTT. (diciembre 2019)

https://developer.ibm.com/articles/iot-mqtt-why-good-for-iot/?mhsrc=ibmsearch_a&mhq=mqtt

ESP8266EX Datasheet. (diciembre 2019)

https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf

Grafana is the open source analytics and monitoring solution for every database. (diciembre 2019)

<https://grafana.com/>

InfluxDB is a time series database designed to handle high write and query loads. (diciembre 2019)

<https://www.influxdata.com/products/influxdb-overview/>

OMS | Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. (diciembre 2019)

<https://www.who.int/es>

Telegraf is the open source server agent to help you collect metrics from your stacks, sensors and systems. (diciembre 2019)

<https://www.influxdata.com/time-series-platform/telegraf/>


Este trabajo se llevó a cabo en el marco del desarrollo de mi trabajo final integrador titulado "Medición y registro de la calidad del aire" de la Especialización en Integración de Tecnologías Informáticas. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán. 20/05/2020

Datos Biográficos

Esp. Ing. José Younes, ORCID : 0009-0006-4370-6785


Ingeniero Electricista con orientación en Electrónica (FACET-UNT). Especialista en Integración de tecnologías Informáticas (FACET-UNT). Profesor adjunto del Departamento de Electricidad, Electrónica y Computación. Participante de proyectos de investigación acreditados. Participante como ponente en Congresos y Jornadas.

E-mail: jyounes@herrera.unt.edu.ar

Esp. Ing. Esteban Volentini, ORCID : 0000-0003-3371-8396

Ingeniero en Computación (FACET-UNT). Especialista en Integración de tecnologías Informáticas (FACET-UNT). Profesor asociado del Departamento de Electricidad, Electrónica y Computación. Participante de proyectos de investigación acreditados. Participante como ponente en Congresos y Jornadas.

E-mail: evolentini@herrera.unt.edu.ar

Mag. Ing. Carlos Albaca Paraván, ORCID : 0000-0001-7404-9315

Ingeniero en Computación (FACET-UNT). Magister en Ingeniería de Software (FI-UNLP) y Magister en Administración (FACE-UNT). Jefe de Trabajos Prácticos del Departamento de Electricidad, Electrónica y Computación. Participante de proyectos de investigación acreditados. Participante como ponente en numerosos Congresos y Jornadas tanto a nivel nacional como internacional.

E-mail: calbaca@herrera.unt.edu.ar



cet

REVISTA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología