

Allin-Wayra: una estación experimental para el monitoreo continuo de la calidad del aire empleando sensores de bajo costo

Sebastián Diez^{1,2}, Edio José Guizzo¹, Tomás Fichetti¹ y Javier Britch¹

¹Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Córdoba, Argentina

²Instituto de Altos Estudios Espaciales "Mario Gulich" (CONAE-UNC), Córdoba, Argentina

Fecha de recepción del manuscrito: 21/09/2018

Fecha de aceptación del manuscrito: 12/012/2018

Fecha de publicación: 26/12/2018

Resumen—Según la Organización Mundial de la Salud, cada año mueren prematuramente siete millones de personas debido a la contaminación del aire, de los cuales la mitad son de países en desarrollo. Los principales responsables de ello son el Ozono, los Óxidos de Nitrógeno, los Compuestos Orgánicos Volátiles, el Material Particulado, el Dióxido de Azufre y el Monóxido de Carbono. Éstos contaminantes impactan en las tasas de mortalidad y morbilidad debido a lesiones, enfermedades respiratorias y cardiovasculares, cáncer, trastornos del sistema nervioso, etc. Es por ello, que surge la necesidad de conocer las concentraciones presentes en la atmósfera. Si bien la Provincia de Córdoba fijó recientemente estándares para la calidad del aire, no cuenta con una red de monitoreo que permita conocer el estado de la atmósfera baja. Esto se debe a los altos costos que suponen la instalación y mantenimiento de este tipo de estaciones. Por este motivo es que se presenta en este trabajo la mini-estación prototipo "Allin-Wayra", la cual ha sido construida con componentes de bajo costo y que registra las concentraciones de distintos contaminantes del aire. Si bien la estación ya se encuentra operativa, resta realizar una serie de etapas para poder validar sus mediciones.

Palabras clave—Contaminación del aire, Monitoreo continuo, Estaciones de bajo costo.

Abstract— According to the World Health Organization, each year seven million people die prematurely due to air pollution, half of it from developing countries. The main responsible for this situation are Ozone, Nitrogen Oxides, Volatile Organic Compounds, Particulate Material, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. These pollutants impact on mortality and morbidity rates due to injuries, respiratory and cardiovascular diseases, cancer, nervous system disorders, etc. That is why it is necessary to know the concentrations present in the atmosphere. Although the Province of Córdoba recently set air quality standards, it does not have a monitoring network that allows knowing the state of the low atmosphere. This is due to the high costs involved in the installation and maintenance of this type of station. For this reason, the prototype "Allin-Wayra" is presented in this work, which has been built with low-cost components and which records the concentrations of different air pollutants. Although the station is already operational, it remains to perform a series of stages to be able to validate its measurements.

Keywords— Air pollution, continuous monitoring, low cost stations.

INTRODUCCIÓN

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), cada año perecen prematuramente siete millones de personas debido a la contaminación del aire, de los cuales la mitad son de países en desarrollo como el nuestro [1]. Los principales responsables de ello son el Ozono (O₃), los Óxidos de Nitrógeno (NO_x), los Compuestos Orgánicos Volátiles (VOCs), el Material Particulado (o PM), el Dióxido de Azufre (SO₂) y el Monóxido de Carbono (CO) [2]. Éstos contaminantes provocan numerosas víctimas mortales y lesiones debido a enfermedades respiratorias y cardiovasculares, cáncer, trastornos del sistema nervioso, etc., incluso a concentraciones relativamente bajas [3]. Es

por ello, que surge la necesidad de cuantificar las concentraciones de dichos contaminantes presentes en la atmósfera baja. Entre las principales causas de la contaminación del aire en ciudades latinoamericanas se hallan las emisiones vehiculares y las emisiones industriales [4]. Sin embargo, hay un gran desconocimiento en la región sobre la calidad del aire. De los 35 países del continente americano, sólo 17 de ellos cuentan con datos disponibles de calidad del aire (CA), y por en general sólo las ciudades más pobladas cuentan con sistemas de monitoreo. En Argentina esta problemática es evidente: sólo la ciudad Buenos Aires, cuenta con una red de monitoreo de CA. Si bien la ciudad de Córdoba fue pionera en la medición de CA con una red de monitoreo móvil de CA en el año 1999 (registraba CO, NO_x, SO₂ y PM₁₀), lamentablemente, y debido a diversas cuestiones de índole financiera, dicho monitoreo fue suspendido y desde el año 2002 la ciudad no cuenta un sistema de medición continuo de CA. Recientemente la Provincia de Córdoba fijó los estándares

Dirección de contacto:

Sebastián Diez, Lopez esq. Cruz Roja, Ciudad Universitaria, X5016ZA.
Tel: 5986000, sdiez@utn.frc.edu.ar

para la calidad del aire a través de la Resolución 105/2017, pero aún no se cuenta con una red de monitoreo provincial. Este desconocimiento sobre la CA se debe principalmente a los altos costos que suponen la instalación y mantenimiento de estaciones de CA, además de algunas limitaciones en el muestreo y en las técnicas analíticas empleadas [5]. Claramente, existe la necesidad de un monitoreo preciso, de bajo costo y sostenido en el tiempo. En ese sentido los sensores de bajo costo podrían ser una solución para monitorear los contaminantes del aire en zonas urbanas cuando se requiere una alta resolución espacial y temporal [6-12]. A partir de esto es que en este trabajo se presenta la mini-estación prototipo denominada "Allin-Wayra" (aire limpio en quechua), la cual ha sido construida con componentes de bajo costo, y que mide y registra las concentraciones de O₃, NO_x, SO₂, CO y PM. Los objetivos de este trabajo fueron (i) construir una estación prototipo de bajo costo para la medición de la calidad del aire, (ii) integrar los distintos sensores en una misma plataforma, (iii) evaluar el comportamiento de los sensores en condiciones reales y (iv) publicar los datos registrados en una plataforma web.

MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema de medición de calidad del aire con sensores de bajo costo fue diseñado para medir con una sensibilidad y precisión aceptables las concentraciones de los denominados "Contaminantes Criterio" en zonas urbanas. Dichos contaminantes criterio son Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Óxido Nítrico (NO), Dióxido de Azufre (SO₂), Ozono (O₃) y Material Particulado (PM₁₀). Para ello se realizó la búsqueda en el mercado de sensores que tengan la capacidad de medir estos contaminantes, tomando como criterio de selección la sensibilidad, la precisión y la accesibilidad en cuanto a costos teniendo en cuenta el bajo presupuesto para el proyecto. Si bien no fue decisiva, también fue considerada la vida útil de los sensores. De acuerdo a esto fueron seleccionados los sensores de la marca Alphasense.



Fig. 1: Sensores electroquímicos y sensor óptico de partículas. Fuente: datasheets de Alphasense.

La estación de monitoreo está compuesta por seis sensores (ver Figura 1), cinco electroquímicos (CO, NO₂, NO, O₃, SO₂) y uno óptico (el de PM). Los sensores electroquímicos funcionan de acuerdo a una serie de reacciones oxido-reducción que se producen cuando el aire ambiente entra en contacto con los cuatro electrodos que cada uno posee: el de trabajo, el de balance, el de referencia y el auxiliar. El sensor de material particulado [13] mide tres distribuciones de tamaños aerodinámicos diferentes: hasta 1 micra (PM₁), hasta 2,5 micras (PM_{2.5}) y hasta 10

micras (PM₁₀) empleando un sensor óptico. Este sensor emplea un láser, entonces cuando el PM ingresa al dispositivo, el haz de luz es dispersado (laser scattering) lo cual es captado por un fotodiodo que luego convierte las variaciones de intensidad de la luz en una señal eléctrica. La conexión entre este sensor y la unidad de procesamiento se realiza a través de un adaptador SPI-USB. En la Figura 2 se puede ver el esquema de integración.

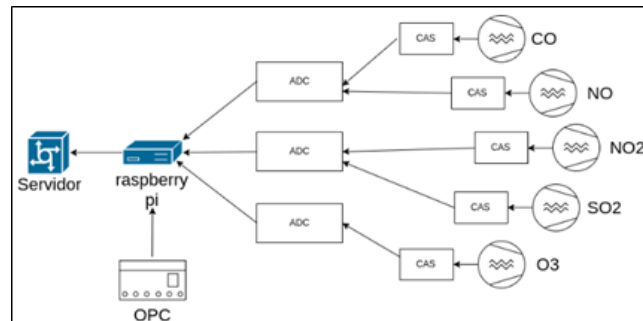


Fig. 2: Diagrama en bloques de la mini-estación. Fuente: elaboración propia.

Dado que la variación de tensión generada por los sensores no puede ser procesada directamente por el ADC (Analog to Digital Converter), fue necesario emplear una placa acondicionadora de señal ISB (Individual Sensor Board) marca Alphasense [14], ya que ésta asegura una baja distorsión de la señal y se puede mantener la precisión de la señal especificada. Este proceso es realizado por un circuito compuesto de amplificadores operacionales, que adecuan la amplitud de la tensión que proviene de los electrodos al rango de entrada que posee el ADC. Posee una entrada de alimentación y dos de salida: una correspondiente al electrodo de trabajo y al de referencia. La señal acondicionada luego ingresa al ADC para su digitalización. La placa empleada en este caso es del tipo Sigma Delta de 18 bits (modelo de encapsulado MCP3424) con 4 entradas diferenciales, en las que se conectan las salidas de la ISB, permitiendo que se conecten dos sensores electroquímicos por placa. A su vez, posee 2 llaves que se utilizan para definir la dirección de escritura a través del protocolo I²C con la placa SBC (Simple Board Computer, marca Raspberry Pi), admitiendo más de un ADC en la misma conexión. En total se emplearon tres conversores para los cinco sensores electroquímicos. Estos se conectan a los pines GPIO (General Purpose Input/Output) correspondientes a la comunicación I²C de la SBC a través de una placa convertidora de tensión. La placa SBC funciona bajo el sistema operativo GNU/Linux Raspbian OS [15]. Para leer y procesar la información generada por los sensores, se ejecuta un script en Python y así obtener el valor de la medición. En el caso del sensor de PM₁₀, se empleó la librería py-opc [16] ya que los datos se obtienen desde el puerto USB y no desde los GPIO. Las mediciones son almacenadas en una base de datos empleando el software InfluxDB [17], para luego ser presentadas gráficamente (ver figuras 3, 4 y 5) mediante una interfaz desarrollada en la plataforma abierta Grafana [18].

La comunicación entre la estación y el punto de acceso se establece a través del protocolo SSH (Secure Shell), el cual emplea técnicas de cifrado. Se puede acceder a la SBC a través de una terminal utilizando el SSH desde una red

local, permitiendo ejecutar y comandar el sistema operativo de la SBC. Para la visualización de la información adquirida por la estación se diseñó una página web [19] que muestra en tiempo real los datos obtenidos y describe de forma general este proyecto. Para ello se utilizó un template HTML5 y herramientas como iframe para la inclusión de gráficos y Brackets para la edición del código web. Iframe es una herramienta que permite insertar documentos dentro de un documento HTML principal [20].

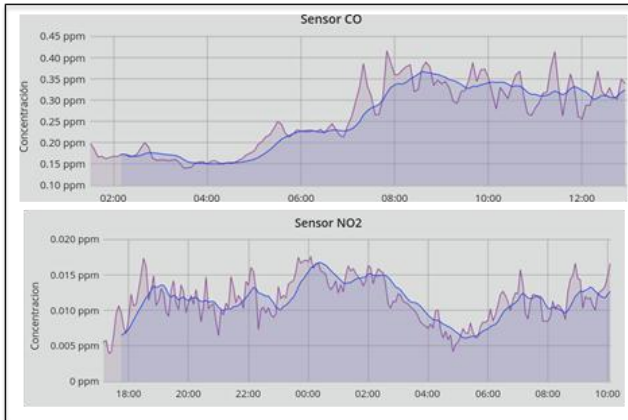


Fig. 3: Datos de CO y NO2 graficados por Grafana. Fuente: elaboración propia.

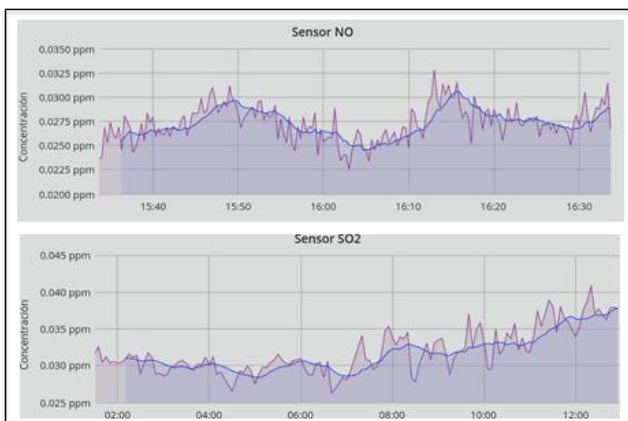


Fig. 4: Datos de NO y SO2 graficados por Grafana. Fuente: elaboración propia.

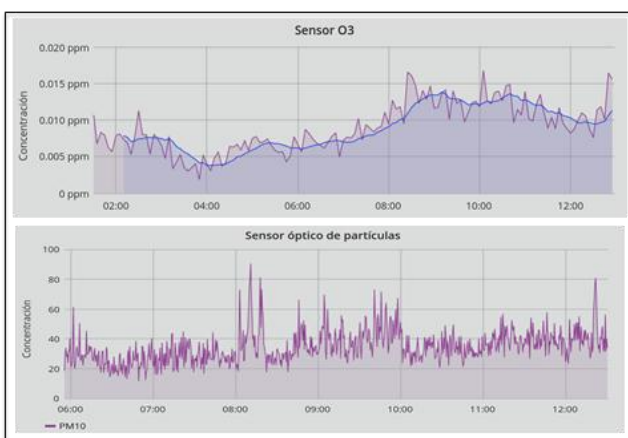


Fig. 5: Datos de O3 y PM10 graficados por Grafana. Fuente: elaboración propia.

el software KiCAD y una placa single layer de pertinax. En la PCB se ubican los tres convertidores ADC, la placa adaptadora de tensión y la fuente DC-DC. El objetivo de esto fue simplificar las conexiones facilitando el reemplazo de los componentes, la comprensión del circuito y la búsqueda de posibles fallas.

En cuanto a la alimentación, todos los dispositivos están conectados a una fuente switching AC-DC (220V-12V) con una potencia de 36W y una corriente máxima de 3A. Dado que las tensiones de trabajo son de una magnitud menor a los 12V, se incorporó otra fuente switching DC-DC (LM2596 Step Down) que produce una caída de la tensión a 5V, valor de alimentación de los sensores, del convertidor ADC y de la placa Raspberry. Debido a la incompatibilidad entre los pines GPIO de la placa Raspberry (los cuales funcionan a 3.3V) y las entradas del convertidor ADC (que funcionan a 5V), se empleó un convertidor lógico de 5V a 3.3V bidireccional de 4 entradas. Este se conecta a través de dos de sus entradas a la comunicación I2C (ADC-Raspberry) compuesta por las señales SDA (Serial Data) y SCL (Serial Clock).

Para proteger los circuitos de la estación se empleó un gabinete de PVC estanco (de 230x310x150mm), el cual posee un grado de protección IP65 [21] y UV, adecuado para ambientes exteriores. Para evitar zonas muertas se construyó un ducto que permite la circulación del aire hacia donde se ubican los sensores electroquímicos, empleando fibrofácil de 3mm. Si bien el flujo de aire es sin forzamiento, en una próxima etapa se añadirá un ventilador para conseguir una mejor circulación. El ducto fue montado sobre la tapa del gabinete estanco y separado de los demás componentes por una placa de fibrofácil en la cual están ubicados los sensores. Esta placa fue realizada empleando el software Freecad, modelando así la ubicación de cada sensor para el ensamblado. En la Figura 6 se pueden ver algunos detalles de la construcción.

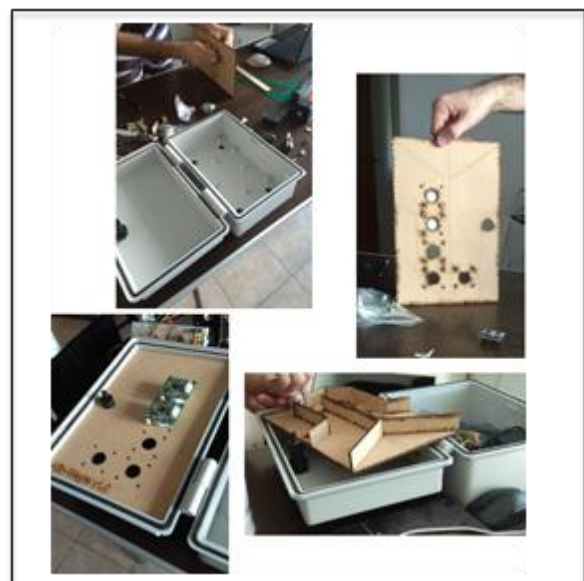


Fig. 6: Construcción del ducto de aire. Fuente: elaboración propia.

Para lograr un diseño modular de la mini-estación se construyó una placa PCB (Printed Circuit Board) utilizando

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El resultado principal de este trabajo fue que se logró construir una estación prototipo de bajo costo para la medición de distintos parámetros de calidad del aire: Ozono, Óxidos de Nitrógeno, el Material Particulado, Dióxido de Azufre y Monóxido de Carbono. Es importante remarcar que se logró la integración exitosa de los sensores en una misma plataforma.

Este primer prototipo mostró un buen funcionamiento y estabilidad en el tiempo en el que fue evaluada. El script de Python fue avanzando en diferentes etapas de acuerdo a los problemas que se presentaron en las pruebas: en un principio, ante cada ejecución era necesario mantener la terminal de Linux abierta (para que el script funcione y corroborar los valores registrados en cada muestra), complicando las mediciones en largos periodos de tiempo, en el que se debía mantener encendida la PC de acceso remoto. También, ante cortes del suministro eléctrico, la Raspberry Pi se reiniciaba generando la detención del script: como solución a este problema se agregó una línea de comando en el arranque que permite iniciarlo luego de que el sistema vuelve a funcionar, algo muy importante para hacer una medición continua sin necesidad del control permanente. Por último, se detectó un error relacionado a la comunicación USB del OPC-N2, en el arranque del driver SPI de Linux, siendo estos los encargados del control del módulo conversor SPI-USB. Una solución efectiva fue la revisión de que los mismos se inicien con el arranque del sistema, para asegurar que ya se encuentran funcionando cuando el script es ejecutado.

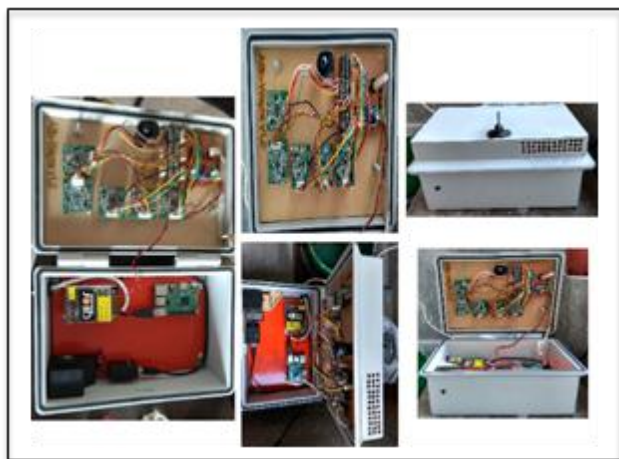


Fig. 7: Imágenes de la estación terminada. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la estructura protectora de la mini-estación, en un principio fue diseñada en una sola pieza con la intención de realizar la impresión 3D, pero no fue llevado a cabo debido a los costos que implicaba. Por esta razón se recurrió a la compra de un gabinete de PVC y al desarrollo de una estructura interna en madera mdf. La estructura elegida resultó ser algo tediosa de ensamblar, debido a que el corte de las piezas no fue realizado con láser, sino que fue de forma manual.

Los sensores fueron testeados en condiciones reales y mediante diferentes pruebas. Primeramente, sin flujo forzado de aire por el ducto de circulación y luego con la implementación de un pequeño ventilador (flujo forzado de aire). Se observaron que los valores sensado variaron, en

algunos casos, de forma significativa, por lo que en la próxima etapa se espera poder contrastar estos valores con sistemas de medición de calidad del aire ya validados y así poder evaluar la performance de Allin-Wayra.

La temperatura desarrollada por los componentes en el interior del gabinete fue un factor de consideración en la etapa de construcción, ya que se ubican en un receptáculo cerrado, apartado del ducto de circulación del aire medido por los sensores. Luego de funcionar por un tiempo prolongado se observó que no este no es un factor que afecte al desempeño del dispositivo (tienen un consumo muy bajo que no exige una alta performance, principalmente de la fuente de alimentación principal).

El desarrollo de la página web resultó una tarea compleja, debido a la falta de conocimiento sobre dicha área. Sin embargo, la utilización de plantillas HTML5 facilitó el desarrollo de una plataforma Web experimental, la cual puede ser consultada en <http://proyectoallinwayra.000webhostapp.com>. Grafana fue una herramienta importante por su alta compatibilidad en la integración de gráficos en páginas web.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A lo largo del proyecto se pudo investigar sobre la gran relevancia que tiene la calidad del aire, sus efectos sobre la salud de las personas y desde luego poder cuantificar los contaminantes que contribuyen al deterioro de la misma al menor costo posible. Por este motivo se desarrolló, y se continúa desarrollando, la estación experimental Allin-Wayra.

En cada etapa llevada a cabo hasta el momento en el desarrollo de esta mini-estación dejó información muy valiosa sobre el funcionamiento de un sistema de este tipo (arquitectura, condiciones de temperatura, cuidados especiales), sobre los principios físicos empleados (sensado electroquímicos y óptico) en la medición de cada uno de los parámetros que registra (O₃, NO_x, SO₂, CO y PM), y sobre sobre el procesamiento de la información y los posibles usos por los usuarios.

El desarrollo de estaciones de este tipo es muy importante para países emergentes, en los que las condiciones económicas generalmente limitan el conocimiento, y por supuesto, el control de las emisiones de gases contaminantes del aire. Es por ello que un proyecto de este tipo tiene un gran potencial, ya que podría ser útil no sólo para la toma de decisiones, sino también permitiría democratizar el conocimiento mediante el acceso masivo a este tipo de información.

Al tratarse de un hardware “a medida”, permite la optimización de los recursos del proyecto y la simplificación del dispositivo, lo que se traduce en un menor consumo de energía por ejemplo empleando una SBC de menor complejidad, módulos RF de bajo consumo, paneles solares de bajo costo, etc.

Por otra parte, es importante remarcar que el costo de adquisición de una estación homologada para medir los parámetros de calidad del aire (CO, O₃, NO_x, PM₁₀ y SO₂) ronda los 400 mil dólares, un costo 150 veces mayor a los costos asociados a la construcción y puesta en marcha de esta estación prototipo. Dicho de otro modo, se podrían

crear una red de estaciones de bajo costo comunicadas entre sí, con más de 100 puntos de medición, permitiendo un nivel de detalle imposible de alcanzar por las redes estaciones comúnmente empleadas.

Como pasos futuros, que pretenden perfeccionar el funcionamiento de Allin-Wayra, se plantea una serie de actividades que se resumen a continuación:

- Comparar de las mediciones de Allin-Wayra con equipos calibrados y validados, logrando así determinar la confianza de las mediciones de la mini-estación.
- Implementar de un sistema de comunicación inalámbrica entre las mini-estaciones y un servidor central, que reciba las mediciones y las suba a una base de datos online. El esquema de comunicación se puede apreciar en la Figura 8.
- Reemplazar la carcasa protectora por una diseñada en una sola pieza e impresa en 3D (ver Figura 9).
- Publicar los planos de construcción y el código fuente, para que la comunidad pueda fabricar sus propios equipos.

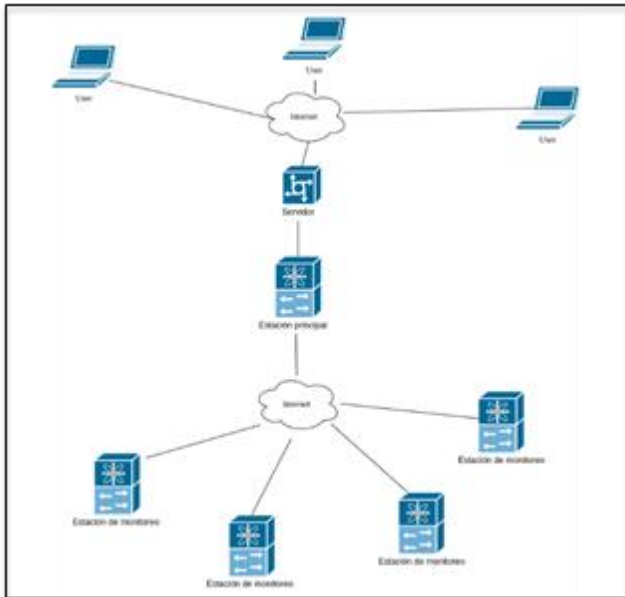


Fig. 8: Esquema de comunicación de la futura red de estaciones. Fuente: elaboración propia propia.

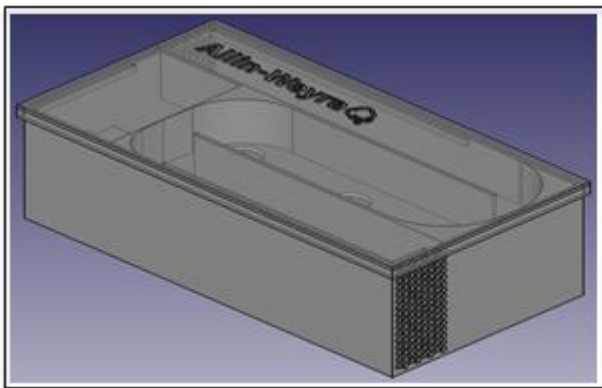


Fig. 9: Carcasa diseñada para impresión 3D. Fuente: elaboración propia.

REFERENCIAS

- [1] J. Lelieveld, J. S. Evans, M. Fnais, D. Giannadaki, y A. Pozzer, «The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale», *Nature*, vol. 525, n.o 7569, pp. 367-371, sep. 2015.
- [2] Organización Mundial de la Salud (OMS). 2006. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Resumen de evaluación de riesgos.
- [3] K.-H. Kim, E. Kabir, and S. Kabir, “A review on the human health impact of airborne particulate matter,” *Environment International*, vol. 74, pp. 136–143, 2015.
- [4] Sportisse B. 2010. *Fundamentals in Air Pollution: From Processes to Modelling*. Springer Dordrecht Heidelberg. London, New York, 350 pp.
- [5] Suriano D., Prato M., Pfister V., Cassano G., Camporeale G., Dipinto S., Penza M. Stationary and Mobile Low Cost Gas Sensor Systems for Air Quality Monitoring Applications. *Dresdner Sensor-Symposium*. DOI 10.5162.
- [6] M. Aleixandre and M. Gerboles, Review of small commercial sensors for indicative monitoring of ambient gas, *Chemical Engineering Transactions*, 30, 169-174 (2012).
- [7] N. Kularatna and B.H. Sudantha, An environmental air pollution monitoring system based on the IEEE 1451 standard for low cost requirements, *IEEE Sensors Journal*, 8, 415-422 (2008).
- [8] A.R. Al-Ali, I. Zualkernan, and F. Aloul, A mobile GPRS-sensors array for air pollution monitoring, *IEEE Sensors Journal*, 10 (10), 1666-1671 (2010).
- [9] J.-H. Liu, Y.-F. Chen, T.-S. Lin, C.-P. Chen, P.-T. Chen, T.-H. Wen, C.-H. Sun, J.-Y. Juang, and J.-A. Jiang, An air quality monitoring system for urban areas based on the technology of wireless sensor networks, *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 5(1), 191-214 (2012).
- [10] D. Hasenfratz, O. Saukh, S. Sturzenegger, and L. Thiele, Participatory air pollution monitoring using smartphones, *The 2nd International Workshop on Mobile Sensing*, April 16-20, 2012, Beijing, China. 2012 ACM 978-1-4503-1227-1/12/04.
- [11] Lanjewar U. and Shah J. Air pollution monitoring & tracking system using mobile sensors and analysis of data using data mining, *International Journal of Advanced Computer Research*, 2(4), Issue 6, 19-23 (2012).
- [12] C.K. Ho, A. Robinson, D.R. Miller, and M.J. Davis, Overview of sensors and needs for environmental monitoring, *Sensors*, 5, 4-37 (2005).
- [13] Optical Particle Counter. [En línea]. Disponible en: <http://www.alphasense.com/index.php/products/optical-particle-counter/>. [Accedido: 10-jun-2018].
- [14] Support Circuits. [En línea]. Disponible en: <http://www.alphasense.com/index.php/products/support-circuits-air/>. [Accedido: 11-jun-2018].
- [15] Raspbian OS - Raspbian. [En línea]. Disponible en: <https://www.raspbian.org/%20-%20Raspbian%20OS>. [Accedido: 10-jun-2018].
- [16] GitHub - dhagan/py-opc: Python wrapper for the Alphasense OPC-N2 built around py-spidev. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/dhagan/py-opc>. [Accedido: 10-jun-2018].
- [17] InfluxData (InfluxDB) | Time Series Database Monitoring & Analytics. [En línea]. Disponible en: <https://www.influxdata.com/>. [Accedido: 10-jun-2018].
- [18] Grafana Features | Grafana Labs. [En línea]. Disponible en: <https://grafana.com/grafana>. [Accedido: 10-jun-2018].
- [19] Proyecto Allin-Wayra. [En línea]. Disponible en: <http://proyectoallinwayra.000webhostapp.com/>. [Accedido: 11-jun-2018].
- [20] iframe, Wikipedia, la enciclopedia libre. 08-ago-2017.
- [21] IEC 60529:1989+AMD1:1999+AMD2:2013 CSV | IEC Webstore | water management, smart city, rural electrification. [En línea]. Disponible en: <https://webstore.iec.ch/publication/2452>. [Accedido: 10-jun-2018].