

Red de monitorización continua de la calidad ambiental en entornos educativos

Javier Diz-Bugarín
Dep. Electrónica
IES Escolas Proval
Nigrán, España
javier.diz@edu.xunta.gal

José L. Rodríguez-Fernández
Dep. Electrónica
IES Escolas Proval
Nigrán, España
chechu@edu.xunta.gal

Manuel Martínez-Méndez
Dep. Electrónica
IES Escolas Proval
Nigrán, España
elmanu@edu.xunta.gal

Montserrat Rodríguez-Paz
Dep. Xeografía e Historia
IES Auga da Laxe
Gondomar, España
montserpaz@edu.xunta.gal

Alberto Pérez Rodríguez
Hermes Smart Control
Nigrán, España
bertopanxon75@gmail.com

Abstract—En este artículo presentamos una red de medición pensada para la mejora de la calidad ambiental y eficiencia energética en centros educativos. Se han creado prototipos de medidores con sensores de dióxido de carbono, temperatura, humedad y luminosidad conectados a la red para almacenamiento remoto y tratamiento posterior de datos, así como otros prototipos autónomos. El diseño y construcción de los equipos se ha podido acelerar aprovechando experiencias previas y ha sido realizado por los profesores y alumnos de electrónica del IES Escolas Proval de Nigrán (España) en el marco de un Proyecto de Innovación concedido por la Xunta de Galicia. En el proyecto participa el IES Val Miñor de Nigrán que colabora en la puesta a punto y explotación de datos y la empresa Hermes Smart Control como centro de transferencia de tecnología que ha realizado un prototipo comercial. El proyecto ya se ha extendido a otros centros educativos, realizando mediciones que demuestran su utilidad para la aplicación de la normativa de ventilación durante la pandemia COVID-19 y se plantean usos futuros como el control automático de ventilación o la mejora de la eficiencia energética en los centros.

Keywords—*Environmental Sensors, Carbon dioxide, Vocational Training.*

I. INTRODUCCIÓN

Las normas de calidad del aire interior [1,2] establecen requisitos de ventilación y de mantenimiento del confort térmico que en ocasiones resultan contradictorios. La ventilación es importante para la prevención de contagios en enfermedades que se transmiten por el aire, pero también afecta fuertemente al rendimiento intelectual cuando el nivel de dióxido de carbono excede los niveles recomendables [3]. Esta situación es especialmente importante en entornos educativos, donde puede causar déficit cognitivo o confundirse con trastornos como el TDA. La ventilación excesiva también afecta al consumo energético de las edificaciones especialmente en invierno, cuando entra en conflicto con las necesidades de calefacción.

El mantenimiento del equilibrio entre todos estos factores constituye un problema de difícil solución que requiere un estudio pormenorizado de cada caso y una información exhaustiva de los parámetros ambientales, que incluya un número elevado de medidas realizadas durante un período de tiempo suficientemente amplio. En el caso de los centros educativos de secundaria el presupuesto no permite adquirir un número elevado de medidores de buena calidad [4,5] por lo que el problema intenta resolverse mediante medidas

puntuales que no aportan suficiente información. Además los medidores comerciales suelen almacenar la información internamente y debe procederse a su volcado posterior, lo que no permite el procesado de los datos en tiempo real.

Para intentar resolver este problema el Departamento de Electrónica del IES Escolas Proval de Nigrán (Pontevedra) solicitó a la Consellería de Educación un Proyecto de Innovación para el desarrollo de prototipos de medidores autónomos o conectados a la red educativa que envían información a un servidor de forma continua, donde queda almacenada y accesible para la comunidad educativa.

Estos medidores pueden adquirir parámetros como la temperatura, humedad relativa, nivel de iluminación o dióxido de carbono. Se han establecido como requisitos que los prototipos sean económicos, fiables, modulares para que se pueda modificar el número y tipo de sensores y fáciles de instalar para que pueda hacerlo cualquier persona de un centro educativo sin formación técnica avanzada. Tanto el hardware como el software serán de código abierto y estarán a disposición de la comunidad educativa para su utilización libre. En la Fig. 1 se presenta la configuración general del sistema desarrollado.

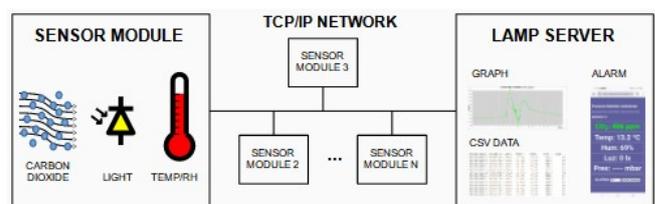


Fig. 1. Configuración general de la red de medida

El alcance del proyecto va más allá de la situación sanitaria actual, aunque los resultados servirán para verificar las medidas adoptadas en este contexto. La información se podrá emplear para medidas generales de control ambiental y eficiencia energética, para estudios sanitarios sobre el rendimiento escolar y patologías asociadas o para el control de otros contaminantes.

Como objetivos didácticos se pueden destacar la utilización de los sensores y prototipos para prácticas de módulos de formación profesional de electrónica, pero también para actividades con alumnado de ESO y Bachillerato y el fomento de vocaciones STEM.

La transferencia tecnológica se produce en primer lugar entre los socios del proyecto como el IES Val Miñor, segundo centro educativo donde se ha implantado la red de medidores, pero ya se ha extendido a otros centros de la zona como el IES Primeiro de Marzo (Baiona) y el IES Auga da Laxe (Gondomar). También participa en el proyecto la empresa Hermes Smart Control, ubicada en el Parque Empresarial Porto do Molle, Nigrán, España. En esta empresa hacen sus prácticas alumnos del instituto y ha desarrollado sus propios productos basados en la experiencia del proyecto, que ya han comenzado a distribuirse en diferentes instituciones de la zona como el Consorcio de la Zona Franca de Vigo o el Concello de Baiona, entre otros.

II. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

Para la definición del sistema se han aprovechado desarrollos anteriores usados para la docencia del Departamento de Electrónica [6,7] y en particular el proyecto de estación meteorológica automática del IES Escolas Proval [8], que lleva 15 años en funcionamiento ininterrumpido y tiene una configuración similar al sistema que se pretende desarrollar. Esta estación continúa la actividad meteorológica iniciada en el centro desde su fundación en 1907, y continuada por el profesor Salvador Rodríguez Muñoz a partir de 1987 como centro asociado del Instituto Nacional de Meteorología (actual AEMET). El proyecto fue diseñado para la difusión pública de la información recogida mediante una página web que se actualiza continuamente presentando datos y gráficas, utilizando para ello la red corporativa de la Xunta de Galicia, por lo que no precisa recursos adicionales.

La red de medición ambiental actual sigue un esquema parecido creando una red de módulos de sensores totalmente independientes entre sí que mandan datos a un servidor común desde cualquier punto con conexión a internet. Esto permite extender la red y colocar sensores en diferentes aulas de un mismo centro o en distintos centros sin importar su distancia o ubicación.

En los apartados siguientes detallaremos las especificaciones generales del sistema y sus elementos.

A. Especificaciones generales

Se trata de crear una red de medida distribuida con las siguientes características:

- Formada por módulos independientes con microcontrolador y varios sensores que envían información a un servidor LAMP (Apache-PHP) mediante red TCP/IP (ethernet/internet).
- El desarrollo de los módulos será mediante hardware y software libre empleando los lenguajes C (microcontrolador) y HTML-PHP (servidor).
- La red será ampliable, incluso a gran escala. Inicialmente está previsto cubrir el ámbito del Val Miñor (Pontevedra), pero podría extenderse incluso a la totalidad de centros de secundaria de Galicia (aproximadamente 300 ubicaciones).
- El número inicial de medidores se establece en 255 como máximo, pero podría ampliarse fácilmente a varios miles con pequeñas modificaciones en el software de los dispositivos.
- Para poder crear una red amplia el coste de los dispositivos debe ser moderado, estableciéndose un límite orientativo de 50 euros.

- Se aprovechará la red educativa para evitar costes de explotación. Por este mismo motivo la conexión será cableada, ya que no es habitual disponer de wifi en todas las aulas.
- El servidor permitirá el acceso inmediato a los datos (casi en tiempo real), universal y permanente. La presentación se hará mediante gráficas y datos numéricos en formato csv para facilitar su copia y tratamiento mediante hojas de cálculo.

B. Elementos del módulo de sensores

Este módulo está formado por un microcontrolador al que se conecta un número variable de sensores y un adaptador para conexión a red. El módulo es compatible con el entorno Arduino, pero con una placa de circuito impreso de diseño propio en la que se puedan montar los diferentes sensores. En lugar de conexión usb está previsto un zócalo para insertar un módulo conversor con FT232R que se usará únicamente para la programación del microcontrolador. A continuación, se detallan los elementos y el proceso de diseño y construcción.

1) Microcontrolador

Como elemento central del módulo se ha escogido el microcontrolador Atmega328P-PU de Atmel, debido a su compatibilidad con el entorno Arduino ya que se utiliza en las placas UNO, Nano y Pro-Mini. Está disponible en encapsulado DIP-28, lo que facilita el diseño de la placa de circuito impreso y su reducido precio (en torno a 2 euros) contribuye al control de costes del módulo. Además, en el instituto ya se había desarrollado una placa compatible para uso didáctico [7] que sirve de punto de partida para el nuevo diseño. En cambio, este microcontrolador sólo tiene 32 KB de memoria de programa, que resulta escasa para la complejidad del programa elaborado. Por este motivo en el apartado de mejoras futuras del sistema se proponen diferentes alternativas.

2) Adaptador de red

Para la conexión externa del módulo se ha optado por un adaptador serie-ethernet cableado (RJ45). Esta decisión se justifica porque en la mayoría de aulas de secundaria están disponibles tomas de red cableada, pero normalmente no hay wifi o está limitada a zonas concretas del centro (salas de ordenadores, administración, dirección). Tampoco se usará configuración dinámica DHCP para respetar la arquitectura de la red educativa en Galicia, basada en direcciones IP estáticas asignadas a cada centro. De esta forma, cada medidor se configura con los parámetros de un centro concreto y para trasladarlo hay que modificar la configuración, lo que evita su uso por personal no autorizado y sirve como mecanismo de seguridad. Además, la configuración dinámica aumenta el tamaño del programa del microcontrolador, ralentiza el proceso de conexión y no puede habilitarse en todos los centros.

De entre las múltiples opciones existentes en el mercado se ha optado por los módulos Wiznet con controlador W5500, que se comunican con el microcontrolador mediante interfaz SPI. Muchos de estos módulos llevan un conector IDC10 con el mismo patillaje, lo que facilita la conexión con la placa mediante un cable plano, y en caso de usar un módulo diferente sólo sería necesario modificar el cable. El precio de estos módulos suele estar por debajo de 4 euros [9].

3) Fuente de alimentación

La alimentación del módulo se realizará a 5V. No se ha previsto incluir ningún regulador para simplificar el montaje. En su lugar se utilizará una fuente comercial (cargador de móvil o similar) preferentemente reutilizada, sirviendo como ejemplo didáctico de reciclaje. Como entrada se usará un

conector usb, que puede cambiarse en función del tipo de alimentador disponible (USB tipo A/B, mini o micro). La tensión debe verificarse para asegurar que está dentro de los límites de los sensores y otros componentes.

4) Sensor de dióxido de carbono

El sensor de dióxido de carbono es un elemento crítico del sistema para que el proyecto resulte de utilidad en la evaluación de la calidad del aire y verificación de la ventilación. El primer paso en la selección es el estudio de las diferentes tecnologías existentes para escoger la más adecuada:

a) Sensores Electroquímicos: Este tipo de sensores se basan en la generación de iones en una celda electrolítica mediante reacciones de oxidación-reducción en presencia de las moléculas del gas objetivo. Como ventaja se puede citar su coste reducido, pero tienen un tiempo de vida limitado y pueden presentar selectividad cruzada ante otras sustancias. Un ejemplo es el modelo MG-812 de Winsen [10].

b) Sensores SMO (Semiconducting Metal Oxide): se basan en la variación de conductividad de un material semiconductor (típicamente óxidos metálicos como SnO₂) a alta temperatura en presencia de gases. Sus principales ventajas son su bajo precio y su facilidad de fabricación, como inconvenientes pueden citarse su baja selectividad para compuestos específicos, su baja estabilidad y su corta vida útil. Además presentan un consumo eléctrico elevado, necesario para calefactar el material sensible. Un ejemplo de este tipo de sensores es el MQ-135 [11], ampliamente utilizado en proyectos de medidores económicos de calidad del aire hechos con Arduino.

c) Sensores PAS (Photoacoustic Spectroscopy): Su principio de funcionamiento es la detección de la vibración mecánica de las moléculas de dióxido de carbono cuando absorben radiación infrarroja. Actualmente comienzan a aparecer en el mercado numerosos sensores con esta tecnología, como el SCD-40 de Sensirion [12] o el XENSIV-PAS-CO₂ de Infineon [13], aunque de momento su disponibilidad es reducida y su precio elevado.

d) Sensores NDIR (Non-Dispersive Infrared): Se basan en la absorción selectiva de longitudes de onda infrarrojas por parte de ciertos gases (4.3 μm en el caso del dióxido de carbono). Esta tecnología de sensores ofrece una alta selectividad y una gran precisión de medida. Como desventaja podemos citar que la medida resulta afectada por otros parámetros (temperatura, humedad, presión) y requieren calibración frecuente. Existen numerosos sensores de este tipo de diferentes fabricantes como Senseair Sunrise [14], Winsen MH-Z19C [15], Sensirion SCD30 [16] o Honeywell CRIR [17].

De todas estas opciones nos hemos centrado en los sensores de tipo NDIR debido a su buena selectividad, precisión y estabilidad. Además la guía de recomendaciones para la ventilación en centros educativos del CSIC [18] basada en la publicada por la Harvard School of Public Health [19] recomienda este tipo de sensores. El criterio de selección ha sido que el sensor tenga unas prestaciones aceptables manteniendo un precio relativamente bajo. Basándonos en este criterio hemos escogido el sensor Winsen MH-Z19C, que tiene las siguientes características:

- Rango de medida 400-2000 ppm
- Condiciones de uso: temperatura -10..+50°C, humedad relativa 0-95%.
- Tensión de alimentación: 5V ± 0.1V.

- Consumo medio: 40mA (máximo 125mA).
- Tiempo de precalentamiento: <1 minuto.
- Salida: UART-TTL, PWM.
- Duración: >10 años.
- Precio aproximado: 20 euros.

5) Sensores de temperatura y humedad relativa

En el mercado existe una amplia gama de sensores para la medida de temperatura y humedad relativa, tanto analógicos como digitales. Aprovechando la experiencia de proyectos anteriores hemos utilizado el sensor SHT30 de Sensirion [20] que mide simultáneamente ambos parámetros y tiene salida digital en formato I2C. Aunque el sensor tiene encapsulado smd hay muchas placas comerciales que ofrecen el sensor montado con conexiones para cable a un precio bajo (<2 euros).

6) Sensor de luz

Se ha previsto incorporar en la placa un sensor de luz ambiente para proporcionar información complementaria sobre el uso diario de los espacios, ya que sirve para revelar tanto la presencia de usuarios con luz artificial como la apertura de ventanas que suele producir un importante incremento de intensidad luminosa. El tipo de sensor previsto es un fotodiodo o fototransistor conectado en modo fotoconductor, con una resistencia que proporciona un nivel de tensión proporcional a la intensidad luminosa. No se ha previsto la calibración del valor resultante para presentar la medida en unidades normalizadas (W/m² o lux) para no complicar en exceso la realización del proyecto.

El sensor escogido debía ser de fácil adquisición y bajo coste, de entre las numerosas referencias existentes se seleccionaron para pruebas dos dispositivos de Osram, un fototransistor SFH-309-5/6 y un fotodiodo BPW34. El fototransistor presenta una gran sensibilidad con poca iluminación, pero en cambio tiene el inconveniente de su reducido ángulo de captación (12°) que provoca una gran dependencia de la medida con la orientación del dispositivo. Por este motivo la selección definitiva ha sido el fotodiodo BPW34 que tiene una sensibilidad suficiente (superficie de 7mm² con una responsividad 0,62A/W) y un amplio ángulo de captación (60°). Se ha combinado con un potenciómetro en serie de valor 10KΩ. Las pruebas efectuadas han demostrado que en ambientes de trabajo con iluminación normal o escasa el fotodiodo ofrece una información clara del encendido o apagado de las luminarias y apertura de ventanas, aunque puede llegar a saturar en presencia de luz solar intensa.

C. Esquema electrónico y placa de circuito impreso

El esquema electrónico del módulo de sensores se ha dividido en una zona de control y otra de sensores. La idea inicial era crear un módulo de sensores conectable a una placa Arduino UNO comercial. Para esto se han previsto los conectores de interconexión de shields Arduino UNO (POWER, IOH, IOL, AD). Posteriormente se incluyó un zócalo para el microcontrolador y los componentes asociados, evitando la necesidad de adquirir una placa comercial. Por último se probó una nueva configuración con un shield ethernet de Arduino apilado bajo la placa de sensores, pero esta solución resultó poco factible porque necesita añadir conectores especiales y complica el trazado de pistas. Por lo tanto se adoptó como solución definitiva la placa integrada con el microcontrolador y sensores (que mantiene las dimensiones y conectores de Arduino UNO), conectada por cable al adaptador Ethernet-SPI mencionado en el apartado anterior.

La placa de circuito impreso lleva un conector de alimentación SIL-2 que permite utilizar diferentes alimentadores usb, un conector IDC-10 para el módulo ethernet, zócalos para los sensores de CO2, temperatura y humedad y un conector de programación SIL-6 compatible con módulos comerciales FTDI. El sensor óptico BPW34 va soldado directamente en la placa. El trazado de pistas se ha realizado con un ancho y separación suficiente para que pueda construirse en el laboratorio del instituto o en un taller de tecnología con equipamiento básico. Por el mismo motivo los taladros de la placa tienen un diámetro mínimo de 1mm. Aunque las placas de circuito impreso definitivas se han enviado a un fabricante comercial, previamente se han elaborado varios prototipos en el instituto para verificar su correcto funcionamiento, lo que ha servido para corregir pequeños defectos en el diseño.

En la Fig. 2 se presenta el esquema electrónico del módulo de sensores y en la Fig. 3 la placa de circuito impreso y el plano de componentes.

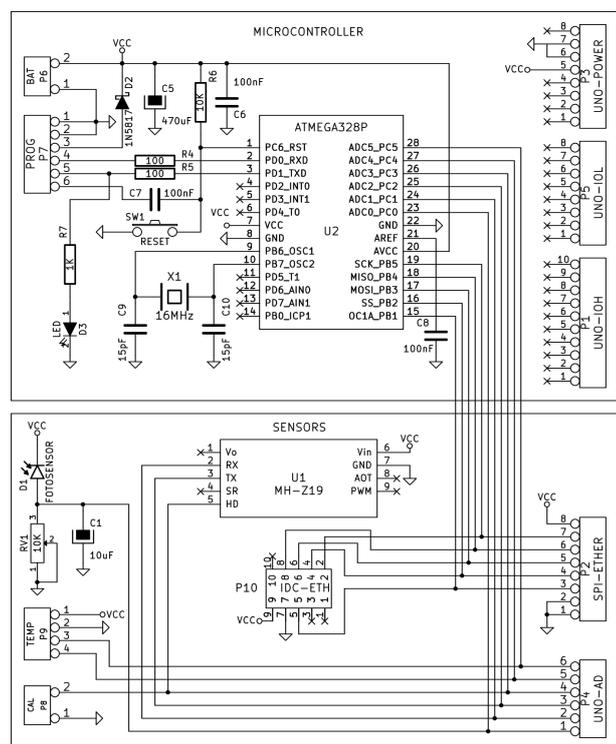


Fig. 2. Esquema electrónico del módulo de sensores

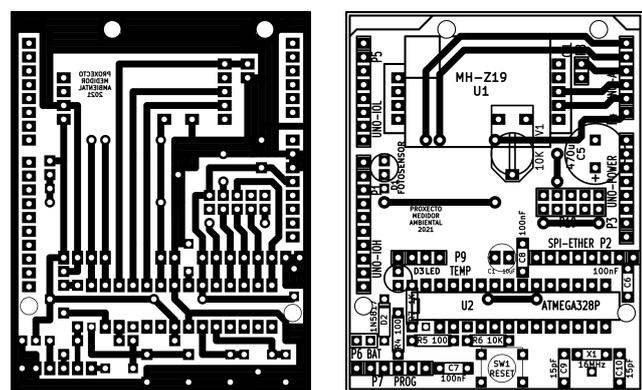


Fig. 3. Trazado de pistas y plano de componentes.

D. Programación del módulo de sensores

El programa del módulo de sensores se ha realizado en lenguaje C sobre entorno Arduino. El programa está estructurado en los siguientes bloques funcionales:

1. Bloque de lectura de sensores con verificación de errores. Se han realizado funciones para la lectura de cada sensor. En algún caso (SHT30) se ha reutilizado código de proyectos anteriores. La lectura se realiza una vez por minuto.
2. Cliente web. El programa emplea funciones de comunicación tcp/ip para enviar los datos de los sensores al servidor externo en modo cliente. Los datos son capturados en un script realizado en lenguaje php que se ocupa de procesarlos.
3. Micro servidor web. El programa dispone de un servidor interno que se emplea para visualizar la información de los sensores (sólo dentro de la red local) y para la configuración del módulo. Pueden modificarse los datos de red o el número de medidor en caso de cambio de ubicación.
4. Configuración eeprom. Los datos de configuración de red (ip, máscara, gateway, dns) se almacenan en la memoria eeprom interna del microcontrolador. También se almacenan otros parámetros como el número de identificación del medidor, la dirección web del servidor o la ruta del script de lectura remota. El programa dispone de parámetros por defecto para la puesta en marcha o en caso de fallo de la eeprom.
5. Calibración de sensores. El programa dispone de una función de calibración que de momento sólo está disponible para el sensor de dióxido.

El entorno Arduino dispone de numerosas bibliotecas de funciones integradas (como la biblioteca Ethernet 2.0) y otras externas como la biblioteca MH-Z19 de Jonathan Dempsey [21], lo que ha permitido acelerar notablemente el desarrollo del código.

E. Servidor de datos

Para el tratamiento y almacenamiento de los datos proporcionados por todos los sensores del proyecto se ha configurado un servidor LAMP, que proporciona la gestión de la página web y permite ejecutar scripts en entorno php. Este sistema replica la estructura del proyecto Meteoproval, que ha dado buenos resultados a lo largo de varios años. Las características de este servidor se detallan a continuación:

1. El sistema funciona bajo el subdominio específico para el proyecto: <http://codos.meteoproval.es>. La palabra codos indica el objetivo de medida de dióxido de carbono (COdos en español) pero también hace referencia al carácter educativo del proyecto.
2. El servidor recibe los datos mediante scripts php y los almacena en formato texto csv en archivos diarios que pueden copiarse.
3. Cada medidor dispone de una carpeta propia en el servidor con scripts php independientes y su propio interfaz web, que presenta los últimos datos recibidos en una barra lateral o widget. También permite el acceso a los datos diarios minutales en formato texto. Además, los datos se presentan en gráficas diarias de temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono. Un formulario permite navegar por los datos anteriores para ver los datos o gráficas y localizar eventos de interés.
4. En cada medidor puede accederse a una pantalla de medida instantánea donde también se puede programar una alarma sonora en caso de superar un nivel especificado de dióxido de carbono. A esta pantalla puede accederse desde diferentes

dispositivos como ordenador, tablet o teléfono móvil.

5. El sitio web tiene un interfaz común hecho en Wordpress Multisite. Cada centro educativo dispone de su propia página dentro del sitio (ejemplo: <http://codos.meteoproval.es/iesproval>) con enlaces a los medidores instalados.
6. Cada módulo de sensores lleva impreso un código QR con el enlace a la web. El usuario podrá conectarse mediante este código para consultar los datos.

Esta estructura modular del sitio facilita su gestión y ampliación, ya que para añadir medidores sólo es necesario crear una nueva carpeta y copiar en ella los scripts, enlazando el nuevo medidor desde la página principal y cada sitio local. Las carpetas de los medidores están todas bajo una ruta común (como /datos/medidor1/). Esto permite el acceso externo para copia de seguridad o descarga de datos por ftp.

En la Fig. 4 puede verse el aspecto general del sitio web y en la Fig. 5 las pantallas de medida instantánea (local y remota con programación de alarma).



Fig. 4. Interfaz web de uno de los medidores del proyecto.

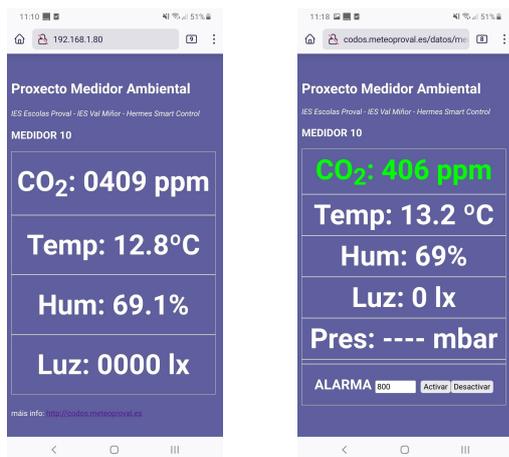


Fig. 5. Pantallas de medida instantánea local y remota con alarma.

III. CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS PROTOTIPOS

Una vez realizadas las primeras pruebas de funcionamiento se encargó la fabricación de un conjunto de placas de circuito impreso a un proveedor externo. La construcción de los medidores se hizo en el IES Escuelas Proval con la participación de estudiantes y profesores del Ciclo Superior "Mantenimiento Electrónico". La Fig. 6 presenta a los estudiantes durante el proceso de soldadura y montaje de las placas.

En la Fig. 7 se muestra una placa montada y uno de los medidores completamente ensamblado. La parte superior e

inferior se han realizado con rectángulos de policarbonato transparente para que la luz llegue al sensor luminoso, y los laterales con una lámina continua de celosía de acero inoxidable para permitir el acceso del aire circundante al interior del medidor y del sensor de dióxido de carbono.



Fig. 6. Montaje de placas en el IES Escuelas Proval

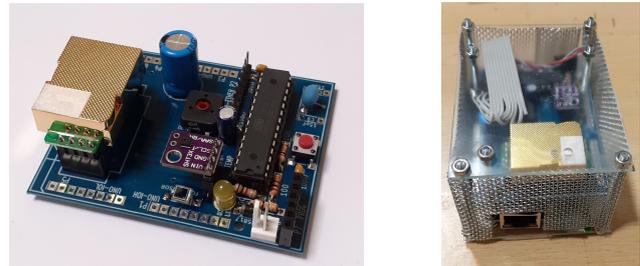


Fig. 7. Placa de sensores montada y módulo terminado

Para la validación de los prototipos realizados se han previsto pruebas comparativas con un medidor de referencia comercial. Para este fin se adquirió un medidor de dióxido de carbono CO-260 de Extech Instruments (FLIR) [22]. Este medidor incorpora un sensor Senseair K30, de mejores prestaciones que el Winsen MH-Z19C.

El primer tipo de prueba consiste en el registro continuo y simultáneo de cada nuevo medidor junto con el de referencia durante un período prolongado de tiempo con oscilaciones importantes de concentración de dióxido de carbono, para comprobar si la respuesta ante las variaciones es similar, las diferencias que presentan y si será posible corregirlas mediante un procedimiento de calibración. De los resultados pueden obtenerse las siguientes conclusiones:

- Hay una buena correlación entre ambos tipos de sensores. Las gráficas son prácticamente iguales a excepción de una diferencia de nivel.
- Esta diferencia de nivel es aproximadamente constante en todo el rango de medida.
- Se han efectuado cálculos para verificar si existe error de ganancia. Para eso se hizo el cálculo de la recta de regresión de valores de uno de los sensores MH-Z19C con el medidor Extech como referencia, resultando la expresión (1). De estos valores se desprende que el error de offset es pequeño (13.4ppm) y existe un cierto error de ganancia (8%).

$$y = 0.92 x + 13.4 \quad (1)$$

- En la gráfica se observa que existe un número elevado de datos en el rango próximo a 400 ppm, que corresponden al nivel mínimo del medidor. Para eliminar este efecto se repite el cálculo eliminando los datos inferiores a 500 ppm, resultando en este caso una pendiente superior a 0.97 (error 3% sobre

el valor medido). Estos resultados son coherentes con la información del fabricante y demuestran el correcto funcionamiento del sensor.

- En el resto de sensores verificados, los resultados son similares con pequeñas variaciones.

En la Fig. 8 se presenta el resultado de la comparación temporal y en la Fig. 9 la correlación entre los valores de ambos.

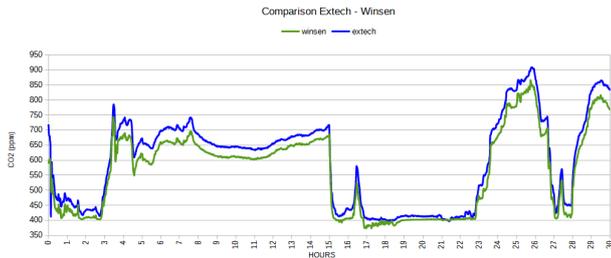


Fig. 8. Comparación temporal de medidores

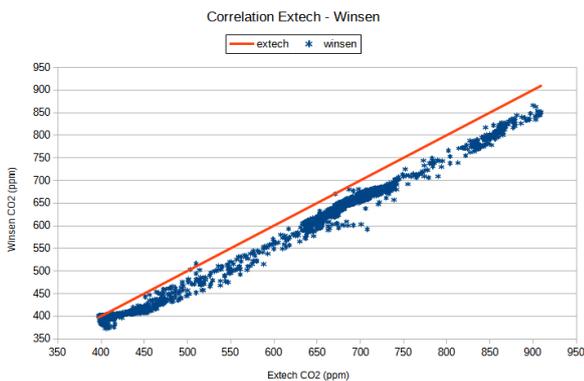


Fig. 9. Correlación entre medidores

Se realizaron otro tipo de pruebas para establecer la dependencia de las medidas obtenidas con la temperatura, uno de los factores que afectan a los sensores de tipo NDIR. Las pruebas han consistido en la comparación con el medidor de referencia generando diferencias de temperatura y observando los datos resultantes. Se aprecian diferencias en el sensor Winsen de hasta 90 ppm para un salto térmico de 1.3°C, mientras el medidor Extech permanece prácticamente estable. De estas pruebas se obtiene como conclusión que los sensores Winsen tienen una variabilidad mayor con la temperatura que el medidor de referencia, factor que debe tenerse en cuenta en las mediciones reales (por ejemplo, en presencia de fuertes corrientes de aire debidas a la ventilación o apertura de puertas y ventanas). La Fig. 10 muestra esta variabilidad durante un intervalo corto de tiempo (2 horas).

Por último se procedió a la calibración simultánea de un conjunto de medidores y comparación posterior con el medidor de referencia. El sensor dispone de un procedimiento interno de calibración que se inicia mediante hardware (pin HD) o mediante una orden software. El procedimiento de calibración está definido por el fabricante y requiere un período de funcionamiento mínimo de 15 minutos en condiciones atmosféricas estables en presencia de aire libre. También dispone de un algoritmo de auto calibración periódica (ABC, Automatic Baseline Calibration) que en nuestro caso hemos desactivado porque en ambiente interior (como un aula típica de instituto) no está garantizado que la renovación de aire sea suficiente para alcanzar el nivel base de 400 ppm. Esto supone que la calibración deberá efectuarse cada cierto tiempo, al menos una vez al mes o más frecuentemente si es posible.

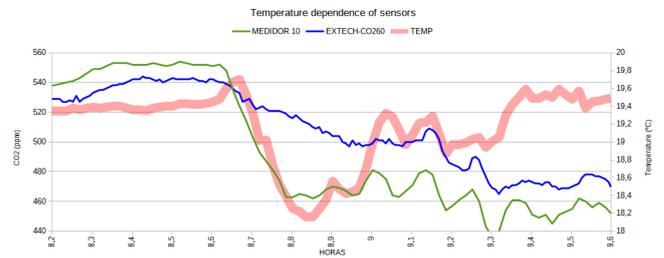


Fig. 10. Variabilidad de los sensores con la temperatura

El conjunto de medidores se mantiene en funcionamiento junto al medidor de referencia durante varias horas para verificar el error que presenta cada uno. Los medidores están situados en el mismo lugar y conectados a un concentrador (switch) común. Una vez establecidas las condiciones de calibración se inicia el procedimiento al mismo tiempo en todos los medidores y se continúa el registro de datos para verificar que el resultado es correcto. En caso necesario se repite la calibración.

La Fig. 11 muestra el registro de un grupo de medidores durante el procedimiento de calibración. Inicialmente los medidores tienen una gran dispersión de valores, con diferencias que llegan hasta 600 ppm. Tras la calibración todos los medidores se mantienen en un rango de valores que difieren 50 ppm respecto del medidor de referencia, lo cual está dentro del margen de tolerancia especificado por el fabricante.

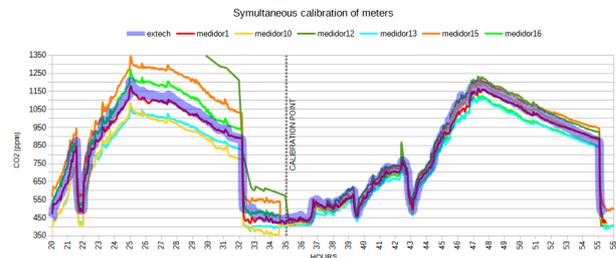


Fig. 11. Resultado de la calibración de un conjunto de medidores

IV. RESULTADOS

A lo largo del curso 2020-21 se han construido y puesto en funcionamiento 20 medidores, a los que se suman otros 4 a comienzo del curso 2021-22. Estos medidores ya han proporcionado un volumen importante de información que ha comenzado a analizarse para extraer conclusiones.

Como ejemplo de resultados obtenidos durante el funcionamiento de los medidores, presentamos a continuación el período de exámenes finales de un aula de Bachillerato del IES Escolás Proval durante el mes de mayo de 2021. En general los niveles de ventilación fueron adecuados durante la mayor parte de los períodos lectivos, excepto días y horas concretas en que el aula estuvo completamente cerrada y los niveles de contaminación se incrementaron de forma importante. En concreto, presentamos dos jornadas lectivas que representan el peor y mejor caso de ventilación. El 3 de mayo de 2021 en el aula se detectan varios eventos: en la primera hora (clase normal) se produce una gran acumulación de dióxido de carbono. En las siguientes horas se celebran exámenes (de 11:30h a 12:50h y de 16:00h a 17:20h). Se concluye que probablemente en todos estos períodos el aula estuvo completamente cerrada y sin ventilación adecuada. Como resultado, se alcanzan valores máximos de 1680 ppm a las 9:34h, 1610 ppm a las 12:45h y 1213 a las 17:16h, con valores medios durante la mañana de 1005 ppm (8:45h-14:30h) y por la tarde de 813

ppm (16:00h-18:10h). Todos estos valores superaron claramente los recomendados por la Guía del CSIC y los umbrales de deterioro cognitivo establecidos por la Universidad de Boulder [3], lo que probablemente tuvo un grave impacto en el rendimiento académico de los estudiantes en este período tan importante de exámenes finales. La Fig. 12 muestra la evolución de nivel de dióxido de carbono a lo largo de esta jornada.

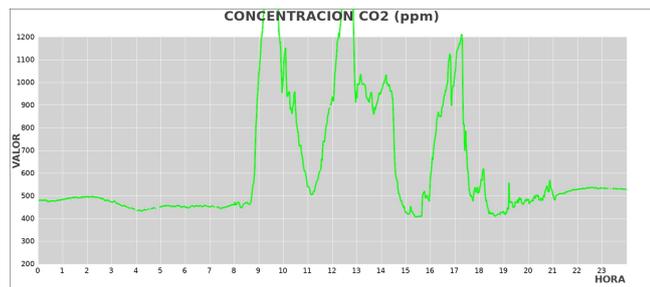


Fig. 12. Nivel de CO2 en el Aula 7 del IES Escuelas Proval (3/5/2021)

El 12 de mayo fue otra jornada de exámenes en el aula, el primero entre las 8:45h y 10:25h y el segundo entre las 10:40h y las 12:50h. A pesar de ser prácticamente consecutivos la ventilación se hizo correctamente, alcanzado valores mínimos a las 11:30h. En ningún momento se superó el valor máximo de 800 ppm, con picos de 733 ppm a las 10:24h, 741 a las 11:50h o 779 a las 12:44h. El valor promedio se sitúa en 588 ppm entre las 8:45h y las 14:30h, claramente por debajo del valor máximo recomendado.

De la gráfica puede deducirse que hubo un período de ventilación intenso a las 11:30h, momento en que las ventanas y puerta del aula estuvieron completamente abiertas facilitando la renovación del aire.



Fig. 13. Nivel de CO2 en el Aula 7 del IES Escuelas Proval (12/5/2021)

Como otro ejemplo ponemos la gráfica de la jornada de entrega de notas de 2º de Bachillerato el 19 de mayo (Fig. 14). En la única hora de ocupación del aula se alcanza un nivel máximo de 1317 ppm a las 9:35h, valor muy superior al recomendable que denota la falta de ventilación en ese intervalo.

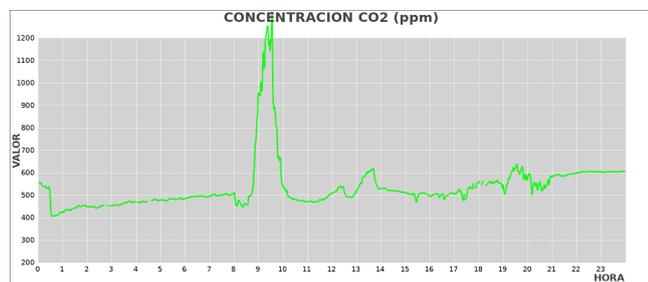


Fig. 14. Nivel de CO2 en el Aula 7 del IES Escuelas Proval (19/5/2021)

V. PROPUESTAS FUTURAS

Durante el desarrollo del proyecto se han detectado problemas y han surgido ideas de mejora, algunas de las cuales se citan a continuación.

- Limitación de memoria de programa del microcontrolador Atmega328. El tamaño de memoria de 32KB dificulta implementar todas las funcionalidades previstas en el programa. Como opción futura se propone cambiar a otros microcontroladores como Atmega644 (64K), Atmega1284 (128K), utilizar la placa Arduino Mega (Atmega2560) o cambiar a otras arquitecturas como el ESP8266 o STM32F103, que pueden configurarse para utilizar el IDE Arduino. Otra opción de reciente aparición es la placa Arduino Nano Every que usa el microcontrolador Atmega4809, con 48KB de memoria flash.
- Procesado automático de datos. Para facilitar la interpretación de los datos almacenados se propone crear scripts en el servidor (en lenguaje PHP) que revise los archivos de datos y detecte eventos de interés. Estos eventos se presentarán en la propia página y quedarán registrados en listas separadas para consulta. Se proponen, entre otros:
 - 1) Detección de valores de dióxido de carbono que superen un umbral especificado y un determinado porcentaje de tiempo en función del horario lectivo.
 - 2) Detección de flancos de subida y bajada que superen una cierta amplitud y detección de picos (flanco de subida seguido de bajada).
 - 3) Promedio de dióxido de carbono en horario lectivo. Por horas y diario. Lo mismo para horario nocturno.
 - 4) Localización de valores mínimos diarios. Este dato servirá para avisar de la necesidad de calibración.
- Automatización de procesos. Utilizar salidas digitales del microcontrolador para el control de ventilación del aula en función de los valores de dióxido de carbono o con un ciclo diario predeterminado. Se pueden controlar extractores de aire o sistemas de apertura de ventanas. Otra opción es que el módulo envíe mensajes a través de la red a elementos de control domóticos que efectúen estas tareas.
- Error del sensor luminoso. En el análisis de las gráficas de iluminación se ha notado una cierta variabilidad periódica, que llega a producir valores erróneos incluso durante la noche. Se ha descubierto que el motivo es la reflexión en el metacrilato de la luz emitida por el sensor de dióxido, que alcanza al fotodiodo. Por este motivo se propone colocar una barrera opaca entre estos elementos o cambiar la ubicación del fotodiodo la placa.

VI. OTROS PROTOTIPOS Y PROYECTOS SIMILARES

En el marco del proyecto se han desarrollado otros prototipos, como los que se citan a continuación:

1) Maqueta didáctica de ventilación. Este sistema autónomo sirve para analizar la eficiencia de sistemas de ventilación en recintos cerrados, controlando parámetros como el flujo de aire y el nivel de dióxido de carbono. Este prototipo se trata más ampliamente en otro artículo presentado a este congreso.

2) Medidor Qair. La empresa Hermes Smart Control ha creado un producto comercial con varias versiones para el control de dióxido de carbono en hostelería, empresas o centros oficiales [23]. La motivación inicial del diseño del

prototipo Qair fue la normativa COVID para locales de hostelería aprobada de urgencia por la Xunta de Galicia en abril de 2021. Este medidor de dióxido de carbono ofrece una doble lectura de los datos en una pantalla a través del nivel en ppm y de un código de tres colores que permite comprobar su estado muy fácilmente de una vistazo rápido. Su forma (Fig. 15) representa un reconocimiento a la vieira como un símbolo de la gastronomía gallega al tiempo que como icono del Camino de Santiago, adaptándola de esta forma al sector hostelero al que va dirigida principalmente.



Fig. 15. Medidor Qair de Hermes Smart Control

Por otra parte, diversos centros educativos y otras entidades han realizado proyectos de medida de dióxido de carbono con diferentes configuraciones. Estos son algunos ejemplos:

3) Colegio Apóstol Santiago (Vigo, España). Han construido 100 medidores modificando proyectos existentes, imprimiendo sus propias carcasas para ahorrar costes. Estos medidores son independientes y no almacenan información. Tienen pensado implementar telemetría en el futuro [24].

4) IES Juan de Lanuza (Zaragoza, España). Sistema de medidores conectados a un servidor local con placa ESP8266 NodeMCU y sensor Winsen MH-Z19C. Almacena datos en una base de datos SQL. Los medidores se han montado en placas de prototipos, aunque está previsto elaborar un circuito impreso propio y carcasa con impresora 3D [25].

5) Carbosense Project. Este proyecto suizo ha creado una red de 300 medidores de dióxido de carbono de bajo coste con sensores Senseair LP8 conectados de forma inalámbrica mediante LoRaWAN. Además incluye medidores de referencia con espectrómetros de alta precisión y otros medidores de calidad intermedia con sensores estabilizados Senseair [26].

VII. CONCLUSIONES

En este artículo hemos presentado un proyecto cooperativo realizado por dos institutos de secundaria españoles, IES Escolas Proval e IES Val Miñor y la empresa Hermes Smart Control. El proyecto, que ha obtenido un premio a la innovación tecnológica y científica otorgado por la Consellería de Educación de la Xunta de Galicia, tiene como objetivo el desarrollo de prototipos de medidores ambientales con sensores de dióxido de carbono, temperatura, humedad y luminosidad entre otros. El desarrollo de los prototipos se ha acelerado notablemente gracias al aprovechamiento de experiencias previas como el proyecto de estación meteorológica del instituto. Los medidores están conectados a la red educativa y envían información de forma continua a un servidor donde queda almacenada y puede consultarse libremente. Se han realizado programas a medida en lenguaje C y PHP para el control de los medidores y tratamiento de datos en el servidor. Actualmente están en funcionamiento un total de 24 medidores en cuatro centros educativos de la zona del Val Miñor (Pontevedra, España), aunque la red podría extenderse fácilmente a un número muy superior de ubicaciones. El

sistema ya está facilitando valiosa información sobre la ventilación de los espacios que servirá para mejorar el bienestar y rendimiento académico del alumnado. La empresa Hermes Smart Control también ha desarrollado productos comerciales en el marco del proyecto. Los alumnos de los centros han podido colaborar en las actividades, desarrollando nuevas capacidades y contribuyendo al fomento de vocaciones STEM. Como planes de futuro se plantean diversas mejoras y otros usos como el control automático de ventilación o la mejora de la eficiencia energética en los centros.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al alumnado del Ciclo Superior de Formación Profesional “Mantenimiento Electrónico” del IES Escolas Proval y al alumnado de ESO y Bachillerato del IES Val Miñor e IES Auga da Laxe por su importante contribución a las actividades del proyecto. También a la Xunta de Galicia por la financiación aportada a través del Proyecto de Innovación de Formación Profesional titulado “Monitorización continua de parámetros físicos para la mejora de la calidad ambiental en entornos educativos”.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] RD 486/97 Condiciones mínimas en lugares de trabajo, <https://www.boe.es/buscar/pdf/1997/BOE-A-1997-8669-consolidado.pdf> (accessed Dec. 19, 2021).
- [2] NTP-549 Dióxido de carbono en la evaluación del aire interior, https://www.insst.es/documents/94886/327064/ntp_549.pdf/e9364a82-6f1b-4590-90e0-1d08b22e1074 (accessed Dec. 19, 2021).
- [3] K Karnauskas, S. Miller, A. Schapiro, “Fossil Fuel Combustion Is Driving Indoor CO₂ Toward Levels Harmful to Human Cognition”, *GeoHealth*, vol. 4, no. 5, pp. 1-8, 2020, <https://doi.org/10.1029/2019GH000237>.
- [4] Licor LI-830 and LI-850 Carbon Dioxide Meters, https://www.licor.com/env/products/gas_analysis/LI-830_LI-850 (accessed Dec. 19, 2021).
- [5] Extech CO-260 Carbon Dioxide Meter, <http://www.extech.com/products/CO260> (accessed Dec. 19, 2021).
- [6] J. Diz, F. García, J. Domínguez, “Modular architecture with microcontroller for advanced electronic practices”, in *X Technol. Appl. to Electron. Teaching (TAEE)*, Vigo (Spain), 2012, pp. 92-97, <https://doi.org/10.1109/TAEE.2012.6235415>
- [7] J. Diz-Bugarín, R. Rodríguez-Paz, “Arduino-compatible microcontroller module for electronics practices and environmental monitoring”, in *XIV Technol. Appl. to Electron. Teaching (TAEE)*, Porto (Portugal), 2020, pp. 113-119, <http://doi.org/10.1109/TAEE46915.2020.9163728>.
- [8] J. Diz, J. F. García, J. Darriba, S. Rodríguez, “El proyecto de estación meteorológica automática del IES Escolas Proval”, *XIV Congr. Ibérico y IX Iberoamericano de Energía Solar (CIES)*, Vigo (Spain), 2008, pp. 1199-1206.
- [9] Wiznet W5500 Ethernet Adapter Module: <https://es.aliexpress.com/item/32824220397.html> (accessed Dec. 19, 2021).
- [10] Winsen MG-812 Carbon Dioxide Sensor, <https://www.winsen-sensor.com/sensors/co2-sensor/mg812.html> (accessed Dec. 19, 2021).
- [11] MQ-135 Carbon Dioxide SMO Sensor, <https://www.winsen-sensor.com/sensors/voc-sensor/mq135.html> (accessed Dec. 19, 2021).
- [12] Sensirion SCD-40 Photoacoustic Carbon Dioxide Sensor, <https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/carbon-dioxide-sensors/carbon-dioxide-sensor-scd4x/> (accessed Dec. 19, 2021).
- [13] Infineon XENSIV-PAS-CO₂ Photoacoustic Carbon Dioxide Sensor: <https://www.infineon.com/cms/en/product/sensor/co2-sensors/> (accessed Dec. 19, 2021).
- [14] Senseair Sunrise NDIR Carbon Dioxide Sensor, <https://senseair.com/products/power-counts/sunrise/> (accessed Dec. 19, 2021).
- [15] Winsen MH-Z19C NDIR Carbon Dioxide Sensor: <https://www.winsen-sensor.com/sensors/co2-sensor/mh-z19c.html> (accessed Dec. 19, 2021).
- [16] Sensirion SCD30 Carbon Dioxide and RH/T Sensor, <https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/carbon-dioxide->

- [sensors/carbon-dioxide-sensors-scd30/co2-sensor-scd30/](#) (accessed Dec. 19, 2021).
- [17] Honeywell CRIR-M1-CO2 NDIR Carbon Dioxide Sensor, <https://sps.honeywell.com/mx/es/products/sensing-and-iot/sensors/gas-sensors/crir-series> (accessed Dec. 19, 2021).
- [18] M. Minguillón, X. Querol, J. M. Felisi, T. Garrido, "Guía para ventilación en aulas", IDAEA-CSIC, Barcelona, Spain, 2020. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.20350/digitalCSIC/12677>
- [19] J. Allen, J. Spengler, E. Jones, J. Cedeno-Laurent, "5 Step Guide to Checking Ventilation Rates in Classrooms", Harvard T. H. Chan School of Public Health, Boston, MA., USA, 2020. [Online]. Available: <https://schools.forhealth.org/ventilation-guide>.
- [20] Sensirion Digital Humidity Sensor SHT3x, <https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/humidity-sensors/digital-humidity-sensors-for-various-applications> (accessed Dec. 19, 2021).
- [21] Jonathan Dempsey Arduino MH-Z19 Library, <https://github.com/WifWaf/MH-Z19> (accessed Dec. 19, 2021).
- [22] Extech Instruments CO-260 CO/CO2 Meter, <http://www.extech.com/categories/air-quality-meters/carbon-dioxide> (accessed Dec. 19, 2021).
- [23] Hermes Qair Carbon Dioxide Meter, <https://metropolitano.gal/extra/qair-asi-es-el-medidor-de-co2-made-in-vigo-que-emula-a-una-vieira-mientras-monitoriza-el-aire/> (accessed Dec. 19, 2021).
- [24] Proyecto de Medidores Colegio Apóstol Santiago (Vigo), <https://www.farodevigo.es/sociedad/2021/04/25/centinela-artesanal-aulas-49108123.html> (accessed Dec. 19, 2021).
- [25] Proyecto IES Juan de Lanuza (Zaragoza), <http://iesjuandelanuza.catedu.es/wp-content/uploads/2021/02/Control-de-niveles-de-CO2-en-las-aulas.pdf> (accessed Dec. 19, 2021).
- [26] Carbosense Project, <https://amt.copernicus.org/preprints/amt-2019-408/amt-2019-408.pdf> (accessed Dec. 19, 2021).