

Fecha de presentación del proyecto	
Sesión de Consejo de aprobación	
Clave del proyecto asignada por el Consejo Divisional	

# Sistema de monitorización y control de variables físicas en áreas extensas

## Línea de investigación del cuerpo académico

### Responsables del Proyecto

Dr. Adán Geovanni Medrano Chávez.  
Departamento de Matemáticas Aplicadas y Sistemas.  
Ingeniería en Computación.

Dr. Luis Ángel Alarcón Ramos.  
Departamento de Matemáticas Aplicadas y Sistemas.  
Ingeniería en Computación.

### Participante

Dra. Areli Rojo Hernández.  
Departamento de Matemáticas Aplicadas y Sistemas.  
Ingeniería en Computación.

### Orientación

- Investigación aplicada.
- Desarrollo de tecnología.

### Fecha de inicio

11 de julio de 2022.

### Duración

Un año.

# 1 Resumen

Actualmente, el mercado ofrece una amplia gama de sensores inalámbricos que permiten medir diferentes magnitudes físicas dentro áreas confinadas del tamaño de una casa habitación o una pequeña empresa. Además, estos sistemas pueden estar provistos de actuadores que reaccionan *inteligentemente* ante los valores recolectados por los sensores. Sin embargo, los sistemas comerciales resultan generalmente insuficientes para ser desplegados en un área extensa debido a que sus características intrínsecas los limitan a operar sobre redes de área local. Para superar esta limitante, una red de sensores y actuadores inalámbricos compatibles con la tecnología de la Internet de la Cosas puede ser diseñada e implementada. Con base en esta declaración, en este documento presentamos un proyecto tecnológico que busca desarrollar los componentes de una red de sensores y actuadores que monitorearía y controlaría, sobre un área extensa y en medida de sus restricciones de diseño, al menos las siguientes variables físicas: nivel de CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad relativa.

## 2 Antecedentes

### 2.1 Contexto

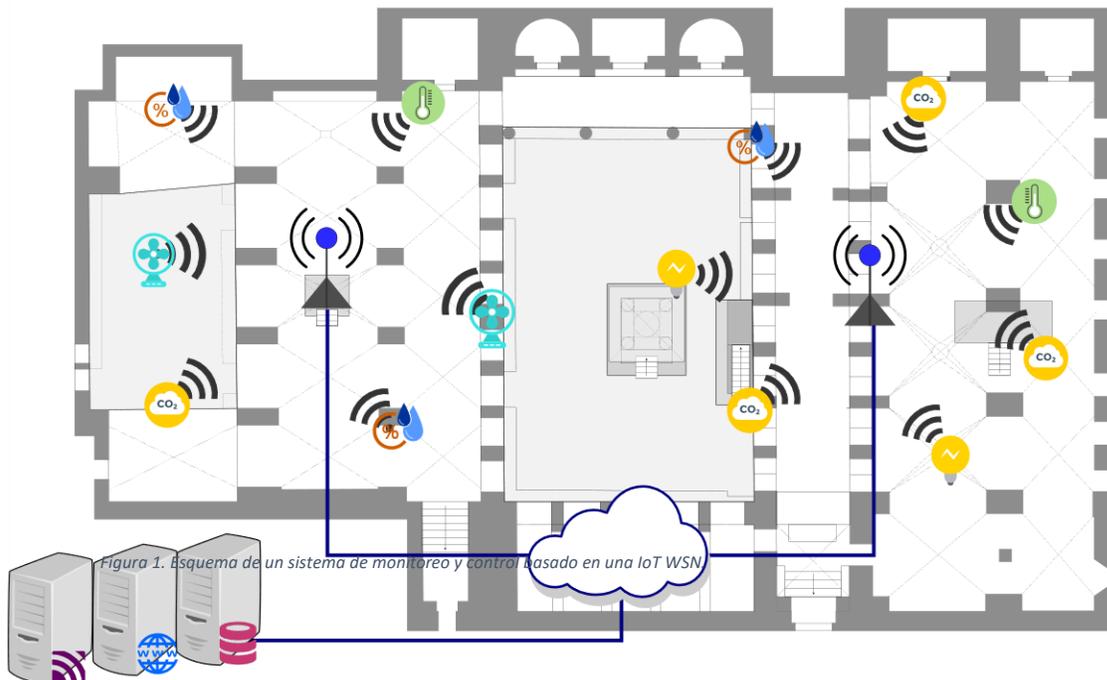
La medición y el control sobre las variables físicas de nuestro entorno permite tomar decisiones inteligentes que nos beneficien en materia de salud, economía y educación. En la práctica, el monitoreo y control de la temperatura y la humedad permite la preservación del patrimonio cultural resguardado en un museo. En cuanto a la producción de bienes de primera necesidad, el monitoreo de estas mismas variables puede dar información que permita un posible aumento del rendimiento de los cultivos. Asimismo, el monitoreo del nivel de luminosidad puede emplearse para controlar un sistema de iluminación. Actualmente, se ha vuelto de interés el monitoreo de los niveles de CO<sub>2</sub> dentro de espacios confinados porque esta magnitud indica que el aire está viciado y que, por razones de salud, el espacio debe ventilarse, ya sea mediante algún mecanismo que favorezca la ventilación cruzada o a través del desalojo de las personas del área.

Las características de un sistema de monitoreo de variables físicas están en función del cumplimiento de varios requisitos, tales como el lugar donde se implemente, el presupuesto del cual se disponga, así como de las características tecnológicas propias del sistema. En cuanto a las características del área a monitorear, si ésta es pequeña (aproximadamente del tamaño de una casa habitación o una pequeña empresa), entonces un sistema comercial que permita la lectura y el control de las magnitudes físicas mediante actuadores es suficiente. Por el contrario, si el área de observación es amplia (del tamaño de un campus universitario o un edificio corporativo), entonces el sistema de monitoreo adecuado es una red de sensores y actuadores inalámbricos.

Las redes de sensores inalámbricos (WSN, *Wireless Sensor Network*) se definen como sistemas de comunicación diseñados con el fin de monitorear las propiedades físicas de un lugar, generalmente extenso [1]. Las WSN se integran por sensores inalámbricos que digitalizan los valores de las magnitudes físicas a las que reaccionan para enviarlos a un sumidero de datos (*sink*) [2]. Los datos recolectados por el sumidero pueden ser accedidos por otros agentes externos a la WSN. Asimismo, el sistema puede recibir, manual o automáticamente, comandos que permitan la activación de actuadores, tales como lámparas, ventiladores, motores o cualquier otro mecanismo que permita controlar una variable física.

Cuando los *nodos*<sup>1</sup> de la WSN ejecutan los protocolos de la pila TCP/IP e interactúan con diferentes tipos de servidores, entonces se tiene una WSN compatible con la Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*). Según Greengard [3], la Internet de las Cosas son «*objetos conectados entre sí mediante un sistema de cómputo, almacenamiento y comunicaciones. Estos objetos están equipados con un chip que permite su interconexión [a la Internet]. Además, los objetos tienen asignado un identificador único universal, p. ej., una dirección de Internet (IP) [que permite que se diferencien entre sí]*».

La Figura 1 ilustra un sistema de monitoreo basado en una red de sensores y actuadores inalámbricos. Específicamente, el sistema se compone de sensores inalámbricos de humedad, temperatura y CO<sub>2</sub>. Además, tiene por actuadores lámparas y ventiladores inalámbricos. La infraestructura de red que conecta a los sensores y a los actuadores está basada en puntos de acceso inalámbricos tipo Wifi. Estos puntos de acceso se encuentran conectados a la infraestructura de una Internet privada (representada con una nube) que puede tener acceso o no a la Internet pública. Esta infraestructura privada permite que los sensores y los actuadores se comuniquen con diferentes tipos de servidores, en la imagen se ilustran tres: un servidor MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), un servidor web y un servidor de almacenamiento de datos. El primer servidor permite que los sensores y actuadores intercambien datos y reciban comandos, el segundo permite que los usuarios del sistema puedan acceder al sistema desde un navegador web y el tercero registra las mediciones que los sensores recolectan.



<sup>1</sup> Con el fin de simplificar la lectura de la descripción de este proyecto, denotaremos con el término *nodo* a los sensores y actuadores inalámbricos.

La descripción sobre la Figura 1 arriba mencionada corresponde a una configuración de las varias que pueden darse si, por ejemplo, se emplean otro tipo de puntos de acceso basados en tecnologías inalámbricas, tales como aquellas basadas en radios de largo alcance (LoRa, *Long Range radio*) o radios ZigBee, entre otras.

## 2.2 Problema

El despliegue de un sistema de monitoreo y control de magnitudes físicas ambientales pensado para operar sobre un área extensa, depende del cumplimiento de una serie de requisitos que no se satisfacen fácilmente si se emplean nodos comerciales, como se explica enseguida.

- Extensión del área de monitoreo. En general, los sistemas comerciales están diseñados para operar en redes de área local privadas (LAN, *Local Area Network*). Esta característica implica que: a) todos los nodos de la red y los servidores del sistema deben conectarse a un único punto de acceso y b) los servicios no se pueden acceder sino dentro de la LAN.
- Configuración de los nodos. Dependiendo del fabricante, los nodos pueden disponer o no de una interfaz de configuración, quizás engorrosa de manejar debido a la simplicidad propia de los dispositivos. Asimismo, esta interfaz de configuración generalmente no está diseñada con el objetivo de configurar remotamente un conjunto grande de componentes.
- Recolección de los datos. El sumidero de datos es difícil de implementar si los nodos ejecutan protocolos privados o incompatibles. Es importante disponer de un sumidero de datos para leer y, posteriormente, analizar cualquier magnitud física monitoreada por la WSN.
- Actualizaciones de software: Los nodos pueden disponer de un programa de actualizaciones o no, dependiendo del fabricante. Este programa es importante porque los sistemas IoT son vulnerables a ataques cibernéticos. Asimismo, mediante actualizaciones es posible corregir algún mal funcionamiento de los componentes.
- Interoperabilidad: Los fabricantes y sus asociados pueden tener acuerdos comerciales que permiten que sus nodos puedan comunicarse con los de otro. La inexistencia de dichos acuerdos implica que los dispositivos ofrecidos por diferentes fabricantes no puedan comunicarse directamente entre sí. Particularmente, resulta aún más complicada la interoperabilidad entre los sensores y los actuadores.
- Bajo nivel de extensibilidad: Los dispositivos comerciales difícilmente: a) pueden tener nuevas funcionalidades o b) pueden ser modificados.

El incumplimiento de estos requisitos implica que la puesta en marcha de un sistema de monitoreo y control de variables físicas sobre un área extensa, construido a partir de componentes comerciales, no sea factible.

## 3 Objetivos

Se propone resolver el problema mencionado en el apartado 2.2 mediante el cumplimiento de los siguientes objetivos.

### 3.1 Objetivo general

En un plazo de un año, *diseñar e implementar los componentes de un sistema de monitoreo que permita registrar, así como medir y controlar, remota y automáticamente, las magnitudes de las*

*variables físicas de un área de observación extensa*. Los componentes de la red deben ser capaces de cubrir un edificio, aprovechando la infraestructura de red disponible o, en su defecto, disponiendo de radios LoRa, así como de las compuertas (*gateway*) que sean necesarias. Las variables físicas que el sistema debe monitorear al menos son estas tres: nivel de CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad relativa. Para garantizar su interoperabilidad, estos componentes deben ser compatibles con los protocolos libres de la IoT y deben basarse en software libre. Además, los componentes deben tener cierto grado de extensibilidad, para esto, el software debe recibir remotamente reconfiguraciones, correcciones o nuevas funcionalidades mediante programación OTA (*Over-the-Air*). De igual manera, el microcontrolador de los nodos se conectará con sus sensores o actuadores mediante un bus de datos I<sup>2</sup>C; esto permitirá leer y enviar diferentes datos al sumidero.

### 3.2 Objetivos particulares

1. Diseñar e implementar al menos dos tipos sensores inalámbricos: uno de variables ambientales y otro de conteo de personas; todos estos reconfigurables, reprogramables y actualizables por software mediante un marco de programación OTA.
2. Diseñar e implementar un actuador inalámbrico reconfigurable, reprogramable y actualizable por software mediante un marco de programación OTA.
3. Diseñar e implementar un sumidero de datos.
4. Diseñar e implementar un servicio web que permita leer y consultar los datos que los sensores recolectan.
5. Diseñar e implementar un servicio de actualizaciones OTA que permita reconfigurar, corregir o mejorar el software de los sensores y actuadores de manera remota.
6. Diseñar e implementar una aplicación de configuración de sensores y actuadores inalámbricos.
7. Diseñar e implementar un sistema de extensibilidad de hardware que opere con al menos tres tipos diferentes de sensores compatibles con el protocolo I<sup>2</sup>C.

## 4 Descripción del proyecto

### 4.1 Hipótesis

Los requisitos enlistados en el apartado 2.2 pueden satisfacerse si el sistema de monitoreo y control se basa en una WSN compatible con la tecnología IoT, de tal manera que sus nodos:

- se conectan mediante una Internet privada o radios de largo alcance,
- admiten reconfiguraciones, reprogramaciones y actualizaciones,
- envían datos a un sumidero que los almacena para su posterior análisis,
- se basan en software libre y
- su arquitectura de hardware permite agregar o cambiar sensores o actuadores.

### 4.2 Método

- A. Diseño e implementación del sensor de variables ambientales.
  1. Diseño de la arquitectura de hardware del sensor inalámbrico de variables ambientales.
  2. Implementación de la arquitectura de software en Arduino C.
  3. Verificación del funcionamiento de los componentes del sensor inalámbrico de variables ambientales.

4. Prototipado del sensor inalámbrico de variables ambientales.
  5. Verificación del funcionamiento del prototipo del sensor inalámbrico de variables ambientales.
- B. Diseño e implementación de un sensor inalámbrico de conteo de personas.
1. Diseño de la arquitectura de hardware del sensor inalámbrico de conteo de personas.
  2. Implementación de la arquitectura de software en Arduino C.
  3. Verificación del funcionamiento de los componentes del sensor inalámbrico de conteo de personas.
  4. Prototipado del sensor inalámbrico de conteo de personas.
  5. Verificación del funcionamiento del prototipo del sensor inalámbrico de conteo de personas.
  6. Redacción de reporte técnico.
- C. Diseño e implementación actuador inalámbrico.
1. Diseño de la arquitectura de hardware del actuador inalámbrico.
  2. Implementación de la arquitectura de software en Arduino C.
  3. Verificación del funcionamiento de los componentes del actuador inalámbrico.
  4. Prototipado del actuador inalámbrico.
  5. Verificación del funcionamiento del prototipo del actuador inalámbrico.
  6. Verificación de la interoperabilidad entre los sensores y el actuador inalámbrico.
- D. Diseño e implementación del sumidero de datos.
1. Diseño de la arquitectura del software del sumidero de datos.
  2. Definición de la estructura de la base de datos.
  3. Implementación de la arquitectura del sumidero de datos.
  4. Verificación del funcionamiento del sumidero de datos.
- E. Diseño e implementación de un servicio web.
1. Determinación de los requisitos funcionales del servicio web.
  2. Diseño de la arquitectura del servicio web.
  3. Implementación de la arquitectura del servicio web.
  4. Verificación del funcionamiento del servicio web.
  5. Redacción de reporte técnico.
- F. Diseño e implementación de un servicio de programación OTA.
1. Determinación de las prestaciones del servicio de programación OTA.
  2. Diseño de la arquitectura del software servicio de programación OTA.
  3. Diseño del software la programación OTA de los nodos.
  4. Diseño del software de programación OTA del servidor.
  5. Integración del software la programación OTA de los nodos.
  6. Implementación del software la programación OTA del servidor.
  7. Verificación del servicio de programación OTA.
- G. Diseño e implementación de una aplicación Android de configuración de nodos.
1. Estudio de la tecnología BLE (*Bluetooth Low Energy*).
  2. Diseño de la arquitectura de software.
  3. Implementación de la arquitectura de software.
  4. Verificación del funcionamiento del software de configuración de nodos.

5. Redacción de reporte técnico.
- H. Diseño e implementación de un sistema de extensibilidad de hardware.
  1. Diseño de la arquitectura de hardware.
  2. Diseño de la arquitectura de software.
  3. Implementación de la arquitectura de hardware.
  4. Implementación de la arquitectura de software.
  5. Verificación del funcionamiento del sistema de extensibilidad.
  6. Integración del sistema de extensibilidad en el sensor de variables ambientales.
  7. Verificación del funcionamiento del sistema de extensibilidad integrado.

## 5 Formación de recursos humanos

Los siguientes alumnos de ingeniería en computación participarán en el desarrollo de este proyecto, particularmente, estarán a cargo de conseguir los objetivos indicados abajo.

<b>Nombre</b>	<b>Objetivo particular</b>
Christian Trejo Delgado	Diseñar e implementar una aplicación de configuración de sensores y actuadores inalámbricos.
Luis Xavier Moedano Aguilera	Diseñar e implementar sensores y actuadores inalámbricos reconfigurables, actualizables y corregibles por software basado en programación OTA.
Brayan Santiago Sánchez Reyna	Diseñar e implementar un servicio web que permita leer y consultar los datos que los sensores recolectan.

Dependiendo del avance del proyecto, podría ser necesario que al menos un alumno de servicio social coadyuve en la realización de las tareas enunciadas en el apartado 4.2.

## 6 Productos esperados

- P1. Dos diferentes tipos de sensores inalámbricos reconfigurables, actualizables y reprogramables; al menos uno de estos extensible en hardware.
- P2. Un actuador inalámbrico interoperable con los sensores inalámbricos.
- P3. Un sumidero que almacene los datos en una base de datos normalizada.
- P4. Un servicio web de lectura de datos.
- P5. Una aplicación de configuración de sensores.
- P6. Un borrador de un artículo completo publicado en una revista científica indexada.
- P7. Tres reportes de proyecto terminal.

## 7 Impacto esperado del proyecto

Una red de monitoreo permite capturar y almacenar los datos de diversas variables físicas y, con ello, vigilar y controlar su comportamiento para satisfacer diversos objetivos asociados, por ejemplo, a la salud, al bienestar, la seguridad, a la agricultura, entre otros, e incluso a fortalecer el desarrollo tecnológico entre los estudiantes, esto derivado del estudio e implementación de diversas tecnologías de información. De esta forma, consideramos que el presente proyecto es capaz de atender diversas problemáticas tanto nacionales como metropolitanas, en específico:

- En términos de salud, es bien sabido que la pandemia COVID-19 ha dado un golpe muy significativo a la humanidad pues ha afectado no solo el índice de mortalidad mundial, sino que también ha impactado a la economía a nivel global. Considerando entonces que la propagación del virus es aérea y que se busca frenar la cadena de contagios, tenemos que el monitoreo ambiental de lugares cerrados en los que las personas conviven es una medida que nos ayudará a prevenir la propagación del virus. Con ello, es posible contribuir a «Garantizar una vida sana», como se establece en el objetivo número 3 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU (ODS), «Salud y bienestar» y que plantea lo siguiente: «*Garantizar una vida sana y promover el bienestar en todas las edades es esencial para el desarrollo sostenible*».
- En cuanto a desarrollo sostenible, este proyecto también podría contribuir a alcanzar el objetivo 11 de los ODS «Ciudades y comunidades sostenibles», el cual nos habla de la prevención y la preparación ante desastres naturales; incluyendo, al objetivo estratégico de Gestión Integral de Riesgos, del Plan General de Desarrollo de la Ciudad de México, el cual habla de «*Proteger la seguridad de las personas frente a riesgos generados por el efecto de fenómenos naturales y por la actividad humana...*». El contar con una red de monitoreo permite que ciudades y comunidades sustentables y sostenibles estén preparadas ante posibles casos de emergencia, apoyando a la salud y bienestar de quienes en estos lugares convivan.
- Involucrar a la comunidad en el desarrollo, implementación y el empleo de redes de monitoreo permitirá participar en alcanzar el objetivo prioritario 1 del programa institucional del CONACYT, el cual habla de «*Fortalecer a las comunidades de Ciencia Tecnología e Innovación y de otros conocimientos, a través de su formación...*» y, desde luego, este trabajo está en coherencia con los objetivos del Programa de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación, del Plan General de Desarrollo de la Ciudad de México, porque contribuye a consolidar un Sistema de Ciencia, Tecnología, Innovación y Humanidades basado en nuestros estudiantes.
- Finalmente, y no por ello menos importante, las redes de sensores permiten monitorear diversas variables climáticas y relativas a la agricultura, esto con la finalidad de fortalecer o beneficiar los sistemas productivos agroforestales. En consecuencia, el presente trabajo contribuirá al desarrollo sostenible, en el programa sembrando vida del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024.

## 8 Recursos

### 8.1 Infraestructura

Este proyecto se desarrollará en el Laboratorio de Redes y el de Fábrica de Software, ambos espacios se ubican en la UAM – Cuajimalpa, en el 7.º piso de la Torre 3.

### 8.2 Hardware y herramientas de software

1. Equipo de cómputo.
2. Fuentes de voltaje.
3. Osciloscopios.
4. Generadores de funciones.
5. Multímetros digitales.
6. Microcontroladores provistos con radios Wifi e interfaces I<sup>2</sup>C.
7. Microcontroladores provistos con radios LoRa e interfaces I<sup>2</sup>C.

8. Programadores de microcontroladores.
9. Sensores de:
  - a. CO<sub>2</sub>,
  - b. temperatura y
  - c. humedad.
10. Actuadores:
  - a. Motores de corriente continúa.
  - b. Lámparas.
  - c. Relevadores.
11. Editor de código fuente.
12. Gestor de versiones de software.
13. Compiladores e intérpretes.
14. Editores de texto.
15. Gestores de actividades.

### 8.3 Recursos humanos

Las personas que llevarán a cabo este proyecto son seis: los dos encargados del proyecto, la participante y los tres alumnos mencionados en el apartado 5.

### 8.4 Financiamiento

El hardware enumerado en la sección 8.2 ya se encuentra disponible en la Fábrica de Software. En cuanto al software, este es libre o gratis; por lo tanto, no se necesita ningún financiamiento para realizar el proyecto.

## 9 Calendario de actividades

En las siguientes tablas se muestra la estructura del desglose de trabajo (WBS, *Work Break Structure*) de cada una de las actividades enumeradas en la sección 4.2. Las claves que se encuentran debajo de la sigla WBS corresponden al identificador de cada tarea. El encabezado de cada tabla indica el número de mes (arriba) y el número de semana (abajo) en el que se desarrollará cada actividad.

Tabla 1. Calendarización de la actividad A: Diseño e implementación del sensor de variables ambientales.

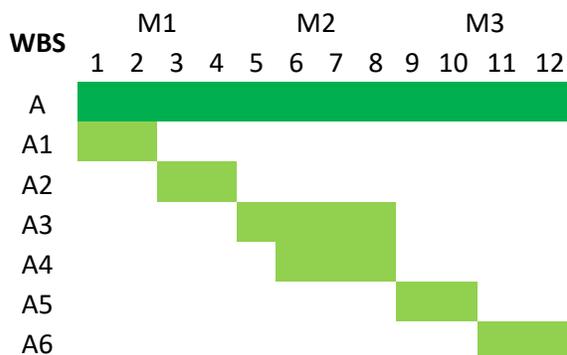


Tabla 2. Calendarización de la actividad B: Diseño e implementación del sensor inalámbrico de conteo de personas.

WBS	M1	M2	M3	M4	M5	M6

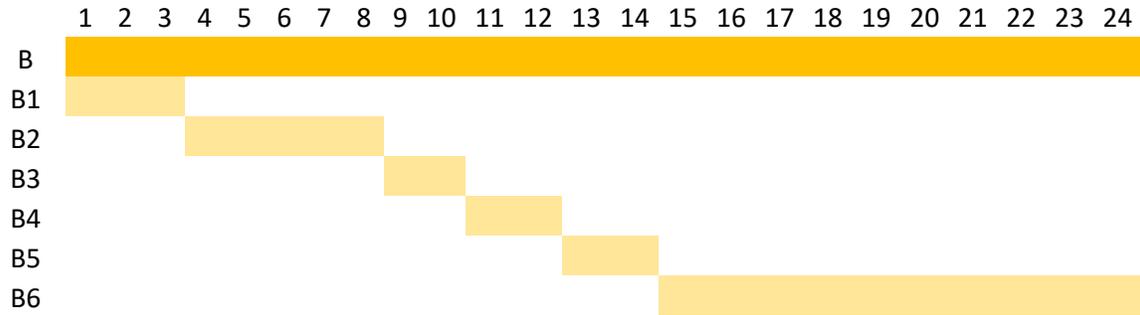


Tabla 3. Calendarización de la actividad C: Diseño e implementación actuador inalámbrico.

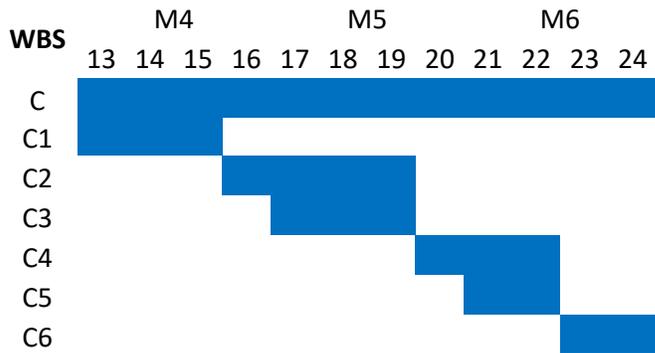


Tabla 4. Calendarización de la actividad D: Diseño e implementación del sumidero de datos.

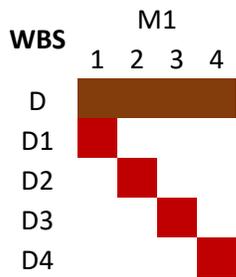


Tabla 5. Calendarización de la actividad E: Diseño e implementación de un servicio web.

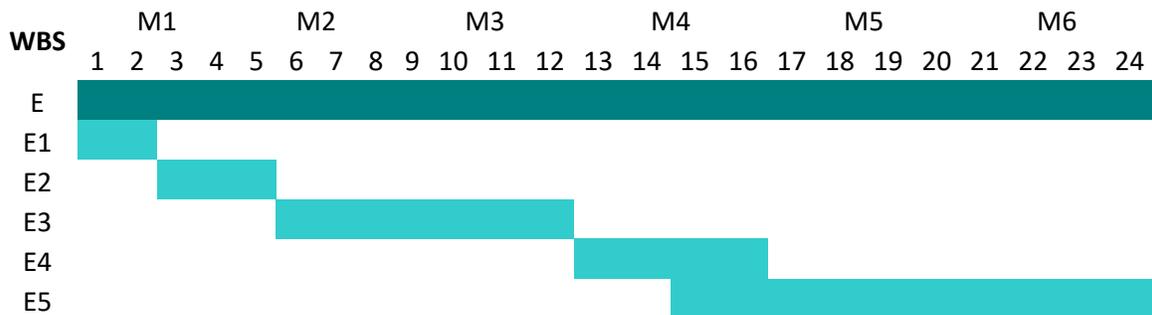


Tabla 6. Calendarización de la actividad F: Diseño e implementación de un servicio de programación OTA.

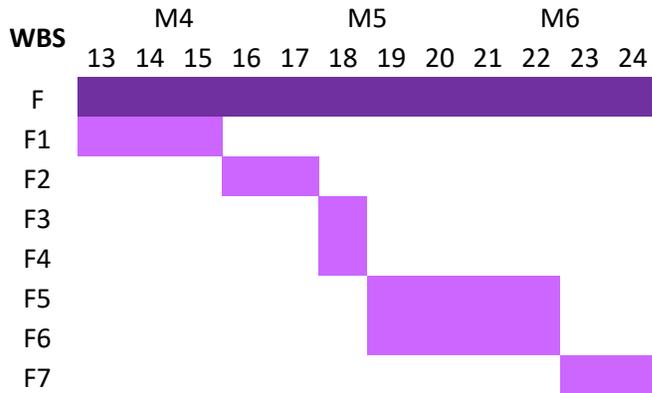


Tabla 7. Calendarización de la actividad G: Diseño e implementación de una aplicación Android de configuración de nodos.

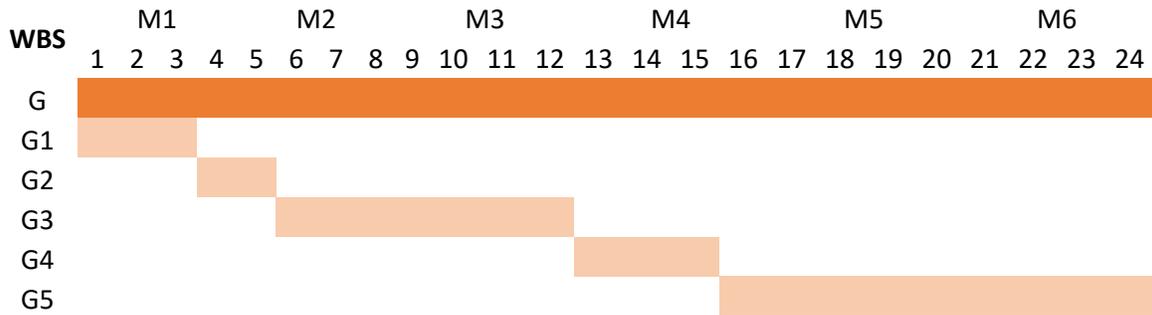
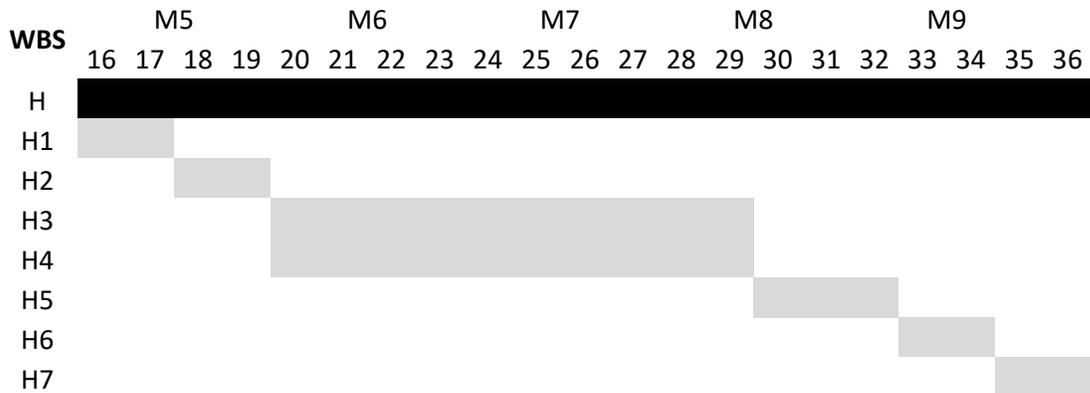


Tabla 8. Calendarización de la actividad H: Diseño e implementación de un sistema de extensibilidad de hardware.



## 10 Seguimiento del proyecto

### 10.1 Calendario de productos esperados

- P1. Tres diferentes tipos de sensores inalámbricos reconfigurables, actualizables y reprogramables; al menos uno de estos extensible en hardware. **Al final del año.**
- P2. Un actuador inalámbrico interoperables con los sensores inalámbricos. **Al final del mes seis.**

- P3. Un sumidero que almacene los datos en una base de datos normalizada. **Al final del mes uno.**
- P4. Un servicio web de lectura de datos. **Al final del mes seis.**
- P5. Una aplicación de configuración de sensores. **Al final del mes seis.**
- P6. Un borrador de un artículo completo publicado en una revista científica indexada. **Al final del año.**
- P7. Tres reportes de proyecto terminal. **Al final del mes seis.**

## 10.2 Resultados esperados

Al finalizar este proyecto, se habrán desarrollado los componentes de un sistema de monitoreo y control que satisfacen los requisitos enlistados en la sección 2.2. Específicamente, se diseñarán al menos dos tipos de sensores inalámbricos y un actuador. Además, se habrán dirigido al menos tres proyectos terminales. Asimismo, se tendrá un borrador completo de un artículo de científico que será publicado en una revista indexada.

## Referencias

- [1] I. Khan, F. Belqasmi, R. Glitho, N. Crespi, M. Morrow, y P. Polakos, “Wireless sensor network virtualization: A survey”, *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 18, núm. 1, pp. 553–576, 2016, doi: 10.1109/COMST.2015.2412971.
- [2] C. Tunca, S. Isik, M. Y. Donmez, y C. Ersoy, “Ring Routing: An Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks with a Mobile Sink”, *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 14, núm. 9, pp. 1947–1960, sep. 2015, doi: 10.1109/TMC.2014.2366776.
- [3] S. Greengard, *The Internet of Things*. MIT Press.