

Prototipo de Sistema para Monitoreo Remoto de Plantas

Roberto Carlos Elizalde Díaz, Christian Arturo Morales García, Sebastián Nava López ,
Juan Águila Muñoz, Erick Eugenio Linares Vallejo

Escuela Superior de Cómputo, I.P.N. Ciudad de México
Tel. 57-29-6000 ext. 52000 y 52021. E-mail: srelizalded1300@alumno.ipn.mx, cmoralesg1301@alumno.ipn.mx,
snavall1300@alumno.ipn.mx

Resumen — En este trabajo se elaboro un prototipo de sistema para monitorear algunos factores que afectan el bienestar de un conjunto específico de plantas, con el fin de ayudar al mantenimiento de huertos urbanos, dirigido a las personas con poca o nula experiencia en el cuidado de plantas

Palabras clave — aplicación móvil, Internet of things, jardinería, servicios web, sensores

1. Introducción

El término Internet of Things (IoT) o Internet de las cosas en español fue utilizado por primera vez por Kevin Ashton, un miembro del centro de investigaciones Auto-ID Center del MIT (Massachusetts Institute of Technology) [1] Este término describe la noción que en el futuro, las computadoras podrán ser concientes de su entorno, y a traves de la interacción con otras computadoras, podrán ofrecer servicios sin la necesidad de la intervención humana. Los dispositivos de IoT son capaces de adquirir datos, procesarlos y comunicarlos para ofrecer servicios basados en objetos del mundo físico. un reporte de inteligencia financiera de la empresa Deloitte señala que el valor comercial del mercado de IoT fue de 400 millones de dólares en 2015, mientras que para el año 2020 se planea que llegué a un valor de 1,100 millones de dólares [2] Por otro lado, desde la década de los 90s se han realizado estudios [3][4] enfocados en el mantenimiento de huertos contruidos dentro de espacios urbanos (huertos urbanos), que han demostrado que existe una mejora en la calidad alimentaria de las personas involucradas en estos espacios, así como mejoras relacionadas con los aspectos de la salud mental de las personas. En México también ha habido análisis que soportan la idea de la autosuficiencia y la soberanía alimentaria con base en este tipo de huertos para poblaciones que radican en zonas urbanas [5]. De aquí que los huertos urbanos representen una opción para mejorar la calidad de vida de las personas en entornos urbanos o suburbanos, sin embargo, el mantenimiento de un espacio de este

tipo puede ser complejo para las personas que sean completamente nuevas al cuidado de plantas o que simplemente no cuenten con la experiencia y el conocimiento necesario para hacerse cargo de este tipo de cultivos ya que se necesita tener un control sobre los cambios de temperatura, la cantidad de luz durante los diferentes estados de crecimiento de la planta, la cantidad de CO₂ en el ambiente, la humedad, la calidad del sustrato de la planta, entre otros factores que en su conjunto pueden afectar la calidad de vida del vegetal y también afectar la calidad de sus productos. Cabe mencionar que, para todos los factores mencionados anteriormente, existen rangos específicos para cada especie que ayudan a que el organismo se pueda desarrollar de la mejor forma y con esto pueda tener una mejor producción.

2. Metodología

Se desarrolló un sistema que puede dar registro a diferentes factores que afectan la vida del vegetal como son las horas que recibe luz solar o artificial, la humedad que tiene su tierra y la temperatura del ambiente, utilizando módulos de medición que contienen sensores. Estos módulos envían datos al servicio web para su almacenamiento y procesamiento, y son presentados al usuario por medio de una aplicación móvil. Adicionalmente, el sistema tiene un banco de datos (base de conocimiento) con rangos ideales para los factores mencionados anteriormente, específicos para un subconjunto de las especies encontradas en los huertos urbanos de la Ciudad de México. Este sistema consiste en 4 elementos mostrados de forma general en el diagrama mostrado en la figura 1

Como se puede observar, existen tres módulos: la aplicación móvil, el asistente virtual y los módulos de medición denominados de aquí en adelante como *nodos*, que estan conectados a traves del módulo de servicios web. Las funciones y la implementación de cada módulo es detallada en los siguientes apartados.

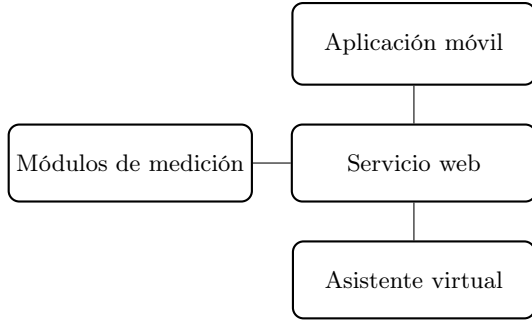


Figura 1: Módulos principales del sistema

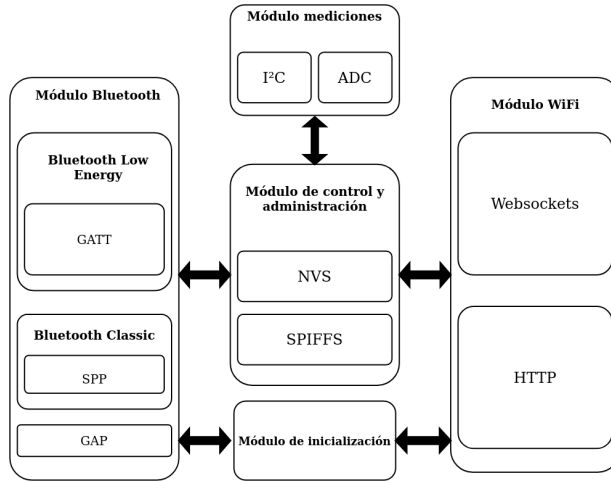


Figura 2: Diagrama general del software para los nodos

2.1. Módulos de medición

Los módulos de medición tienen la función de adquirir datos sobre las variables físicas que afectan a las plantas utilizando los sensores que tiene conectados. Esto fue implementado utilizando un microcontrolador ESP32-WROOM-32D de la compañía Espressif mientras que los sensores que se le equiparon se detallan en la Tabla 1. Por otro lado, el software desa-

Variable	Sensor	Tipo
Humedad	HW390	Análogo
Temperatura	LM35	Análogo
Iluminación	BH1750	Digital

Tabla 1: Lista de sensores montados en el dispositivo

rollado para operar estos dispositivos se diseñó de la siguiente forma: A continuación se describe de forma breve, la función de cada módulo.

2.1.1. Módulo de control y administración

Es el encargado de controlar las funciones de todo el sistema, haciendo uso de los diferentes módulos con

los que cuenta el dispositivo. Otra función que cumple este módulo es la de guardar datos relevantes para la configuración del dispositivo tales como la contraseña del punto de acceso a WiFi o la lista de nodos periféricos vinculados, utilizando el almacenamiento flash del microcontrolador.

2.1.2. Módulo de mediciones

El módulo de mediciones se encarga de implementar la interfaz entre los sensores y el microcontrolador, esto se lleva a cabo utilizando el sensor I²C, en el caso del sensor BH1750, y con el ADC integrado, para el caso de los otros dos sensores. Dentro de este módulo de software se configuran los canales del ADC dedicados a digitalizar la señal de cada sensor y se cargan los módulos que implementan la comunicación digital con el sensor digital.

2.1.3. Módulo WiFi

Este módulo se encarga de establecer una conexión inalámbrica de internet con el protocolo IEEE 802.11, utilizando la antena integrada, adicionalmente se utiliza el protocolo TCP para establecer comunicaciones mediante HTTP o WebSockets. Este tipo de conexiones sirven para enviar los datos de las mediciones a los servicios web, así como para recibir comandos desde este último. Mientras que la parte de WebSockets se encarga de establecer una conexión persistente, el cliente HTTP solamente es usado para realizar peticiones sencillas al servicio web.

2.1.4. Módulo Bluetooth

El módulo Bluetooth es utilizado al momento de aprovisionar un nuevo nodo y cuando dicho nodo opera bajo el esquema de nodo periférico. En el primer escenario, el módulo trabaja en la modalidad de Bluetooth Classic con el perfil Serial Port Profile (SPP), con el que la aplicación móvil puede interactuar con el dispositivo bajo un esquema similar a la comunicación serial. En el segundo escenario, un dispositivo hace uso de su módulo Bluetooth con la modalidad de Bluetooth Low Energy y el perfil Generic Attribute Profile (GATT), para exponer las sus mediciones, y que estas sean recogidas por otro nodo asociado a este, operando bajo la modalidad de nodo central.

2.1.5. Módulo de inicialización

Finalmente, el módulo de inicialización se encarga de preparar el dispositivo en su primer arranque, utilizando los módulos de comunicación descritos anteriormente.

2.1.6. Modos de operación

El dispositivo tiene dos modos de operación:

- Nodo central
- Nodo periférico

Como se menciona anteriormete, un nodo central establece una conexión WiFi para enviar los datos de las mediciones a los servicios web, mientras que un nodo periférico los expone por medio de un servidor GATT utilizando el módulo Bluetooth. El nodo central se encarga de leer los datos expuestos por estos nodos periféricos y los manda al servicio web, utilizando la conexión persistente que establece con este servicio. El número máximo de dispositivos que un nodo central puede atender al mismo tiempo es de 7. Todos los dispositivos son capaces de operar en las dos modalidades sin cambios de hardware.

2.2. Servicio web

El servicio web que une a todo el sistema esta dividido en diferentes módulos, mostrados en el diagrama de la Figura 3. A continuación se describen los mó-

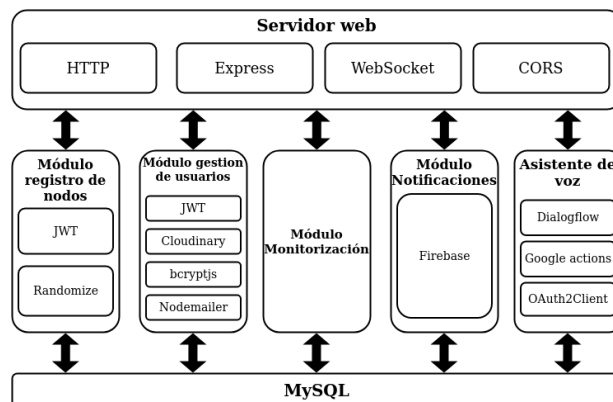


Figura 3: Diagrama general del servicio web

dulos que comprenden este componente.

2.2.1. Servidor web

Se implemento un servidor web utilizando el lenguaje Javascript con plataforma NodeJS y el framework Express. Los servicios se ofrecen a partir de una API con arquitectura Representational State Transfer (REST), así como utilizando WebSockets. Los puntos de entrada, definidos como URLs, sirven para definir a cual de los módulos se debe de llamar para cumplir cierta función.

2.2.2. Módulo de registro de nodos

Este módulo tiene la responsabilidad de manejar los registros de nodos, tanto periféricos como centrales, y generar los token para acceder a los servicios web, en el caso de los últimos.

2.2.3. Módulo de gestion de usuarios

Este módulo se encarga de llevar a cabo todas las operaciones relacionadas con los registros, modificaciones o remociones de los perfiles de los usuarios. Dentro de este módulo se crean y se envían los códigos temporales utilizados para la activación de cuentas de usuarios. Una función importante de este módulo es la de generar tokens criptográficos que sirven para autenticar a los usuarios para hacer operaciones dentro del servicio web.

2.2.4. Módulo de monitorización

Este módulo comprende las funcionalidad que se lleva a cabo cada vez que llega un nuevo mensaje de las conexiones persistentes que se tienen con los nodos. Aquí es donde se registran las lecturas y donde se evalúa el estado de la planta dependiendo de los rangos establecidos en la base de conocimiento.

2.2.5. Módulo de notificaciones

Aquí es donde se implementó la funcionalidad de Firebase, de forma que el servicio web tuviera la posibilidad de enviar notificaciones push desde el servidor a la aplicación móvil. Algunas de las notificaciones que se pueden mandar son alertas en casos de condiciones extremas para las plantas, así como sugerencias para mejorar el cuidado de esta misma.

2.2.6. Asistente de voz

Este módulo comprende la integración con el asistente virtual que se muestra en el diagrama de la Figura 1. El asistente virtual que se utilizó para este sistema fue Google Home, por lo que fue implementado utilizando el kit de desarrollo que comprende Dialogflow, para comprender el lenguaje natural, Google Actions para realizar el despliegue de la aplicación y OAuth2 para la autenticación del usuario entre la base de datos del sistema y la de Google.

2.2.7. Base de Datos (MySQL)

Todo el almacenamiento de datos se realizó utilizando una base de datos relacional con la plataforma de MySQL. Como se puede observar, el almacenamiento de datos es utilizado por todos los módulos que ofrecen funciones al usuario.

2.3. Aplicación móvil

La aplicación móvil esta integrada por diferentes módulos mostrados en el diagrama de la Figura 4.

Esta aplicación móvil fue implementada utilizando la plataforma Android, utilizando el kit de desarrollo para Android 11 (API nivel 30), con la peculiaridad que se utilizaron algunos de los principios recomendados para incorporar las bibliotecas de Android

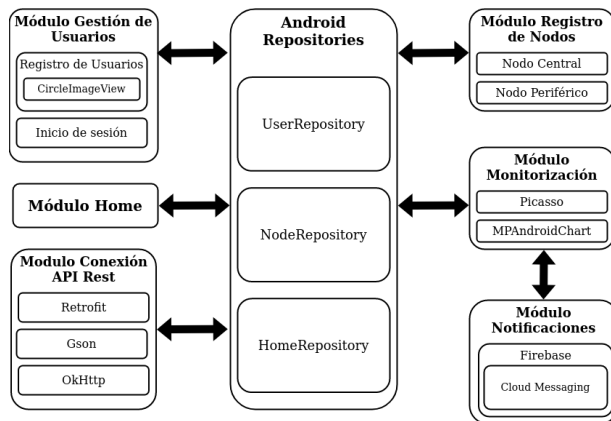


Figura 4: Diagrama general de la aplicación móvil

Jetpack. En las siguientes secciones se describen las funciones de cada módulo.

2.3.1. Módulo de gestión de usuarios

Este módulo cubre el registro de usuarios así como el inicio de sesión. Una función importante contenida en este módulo es la de mantener la sesión iniciada y guardar el token de acceso a los servicios web para mantener las funciones de la aplicación cada vez que se vuelve a ingresar a la aplicación.

2.3.2. Módulo de registro de nodos

Se encarga de implementar las funciones de registro de nodos periféricos y centrales. En ambos casos utiliza el módulo Bluetooth integrado en el teléfono, así como las funciones del módulo de conexión API REST para llevar a cabo estos registros.

2.3.3. Módulo de monitorización

Este módulo se encarga de mostrar los datos recolectados por los nodos, al usuario mediante la pantalla inicial, que muestra los valores más recientes que fueron tomados, además de contar con la capacidad de mostrar una gráfica con los valores tomados en el último día. También se puede observar de forma individual, cada una de las entradas de datos para cada planta y se puede ver una descripción con datos y fotografías de la especie de planta que se esté monitoreando.

2.3.4. Módulo de notificaciones

Este módulo se encarga de mostrar las notificaciones lanzadas por el módulo de notificaciones del servicio web. Esto se realiza mediante la API de Firebase Cloud Messaging para Android. Estas notificaciones de tipo *push* le hacen llegar al usuario las alertas generadas a partir de la recolección de datos y su comparación con la base de conocimientos del sistema, y

ayuda a prevenir condiciones extramás para los vegetales.

2.3.5. Módulo de conexión API REST

En este módulo se llevan a cabo las peticiones HTTP, por medio de la librería Retrofit, y las respuestas se procesan de JSON a objetos Java por medio de la librería GSON.

2.3.6. Módulo de Android Repositories

Este módulo, en conjunto con el de conexión API REST, permite efectuar las peticiones HTTP bajo un modelo asíncrono, lo que ayuda a separar el código de la interfaz con el de las peticiones de forma que no existan retardos al

2.3.7. Módulo Home

Este módulo se encarga de mostrar todos los dispositivos que se encuentran registrados por el usuario, así como servir como el punto de inicio para las operaciones de registro de nuevos nodos.

2.4. Calibración

Se realizó un proceso de calibración para los 3 sensores integrados en cada nodo para verificar que su exactitud y su precisión sean las adecuadas para la aplicación que se les está dando. A continuación se muestran estos procesos junto con su metodología y sus resultados.

2.4.1. Calibración del sensor de temperatura LM35

El LM35 es un sensor de temperatura ambiente, es de tipo activo y lineal cuya relación con el voltaje de salida es de 10mV por cada grado Celsius (10mv/°C), con un rango de -50°C a 150°C , adicionalmente, cuenta con una precisión de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ para el rango completo de medición [6]. Para este proyecto se requiere medir un rango que va desde los -8°C hasta los 45°C , estos extremos representan las temperaturas más extremas bajo las que un organismo vegetal aún puede realizar sus funciones vitales. Se realizaron pruebas de calibración utilizando como referencia (patrón), un termómetro infrarrojo con una resolución de 0.1°C , precisión de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ y rango de -50°C a 550°C .

2.4.1.1 Metodología

La metodología utilizada para elaborar estas pruebas consistió en colocar un sensor LM35 en contacto directo con una superficie a una temperatura específica, dicha temperatura debía de cumplir la condición de mantenerse estable para que el sensor tuviera tiempo para adquirir la temperatura. Posteriormente, se realizaron 10 mediciones consecutivas usando el

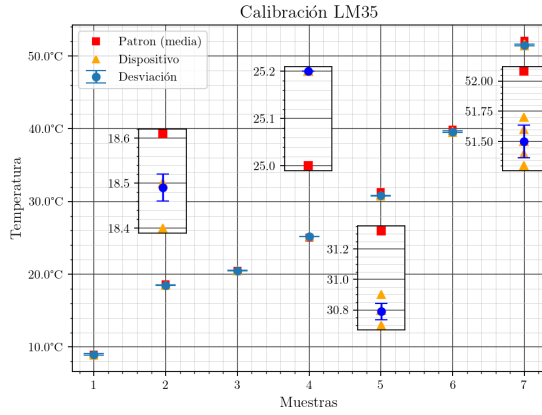


Figura 5: Mediciones con el patrón y el dispositivo para la calibración del sensor LM35

patrón y el sensor conectado al microcontrolador. Se realizaron 7 conjuntos de mediciones de este tipo bajo diferentes temperaturas que se encuentran dentro del rango limitado a la aplicación.

2.4.1.2 Resultados

En la Figura 5 se pueden observar las diferentes muestras tomadas por el dispositivo, así como el promedio de las muestras tomadas por el patrón, ahí se puede observar la diferencia que hay con el patrón así como la dispersión que tienen las muestras del dispositivo. Para este mismo efecto, se muestra una barra de error para cada conjunto de muestras, considerando el promedio de las mediciones del dispositivo, como el centro, y los extremos, como la diferencia de la desviación estándar de forma simétrica.

Patrón		Dispositivo		Error(%)
M.(μ)[°C]	D.(δ)	M.(μ)[°C]	D.(δ)	
8.95	0.07	8.98	0.11	0.34
18.61	0.04	18.49	0.03	0.64
20.47	0.05	20.50	0.07	0.15
25.00	0.0	25.20	0.0	0.0
31.32	0.04	30.79	0.06	1.69
39.88	0.04	39.57	0.12	0.78
52.08	0.04	51.50	0.14	1.11

Tabla 2: Mediciones de la calibración del sensor LM35

En la tabla 2 se muestran los promedios de las mediciones tanto del dispositivo como del patrón para realizar el cálculo del error de las mediciones del primero con respecto al segundo. El error más grande es de 1.69% y se encuentra en las mediciones de 31.32°C, sin embargo, la mayoría de los demás errores se encuentran debajo del 1% y el promedio general fue de 0.79%. Por lo tanto, podemos concluir de

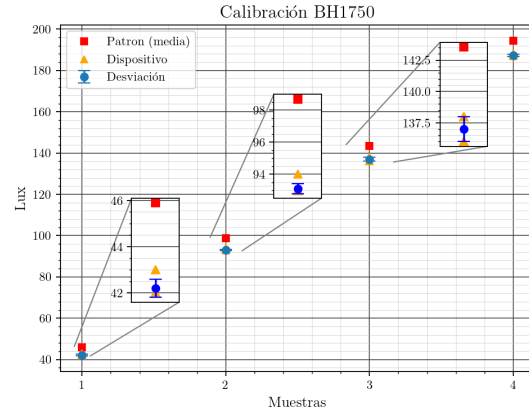


Figura 6: Mediciones con el patrón y el dispositivo para la calibración del sensor BH1750

forma general que el error para la todo el rango de mediciones es de 1%.

2.4.2. Calibración del sensor de nivel de iluminación BH1750

El BH1750 es un sensor digital que mide el nivel de la iluminación en la escala de lux, cuenta con un rango de los 0 a los 65535 lux. Su funcionamiento esta basado en la medición de voltaje de un diodo fotosensible cuya sensibilidad es mayor en los rangos de frecuencia de los 500nm – 600nm del espectro de la luz. El patrón utilizado para comparar las mediciones fue un luxómetro profesional con precisión del 3% para mediciones debajo de los 10klx y 4% mayores a este valor. Su rango de medición va de los 0lx a los 200klx [7]

2.4.2.1 Metodología

Dado que la región mas sensible del sensor es la que va de los 500nm – 600nm, se utilizó un led de color verde apuntado de forma directa al sensor de iluminación y al luxómetro. Estas pruebas se tomaron en un cuarto oscuro con una distancia de 4.5cm entre la fuente de luz y los dispositivos de medición. Se tomaron 10 muestras a diferentes bajo diferentes intensidades luminosas denominadas de mayor a menor: max, high, medium, low.

2.4.2.2 Resultados

En la figura 6 se muestran los conjuntos de medidas con relación a la media del patrón, así como su intervalo de error representado por la desviación estandar. Se puede observar la diferencia que existe con el patrón, sin embargo, esta no muy significativa. Según los datos mostrados en la tabla 3, el mayor error se registra en los niveles más altos de luz y es de

8.98 %, sin embargo, el promedio de este error fue de 5.17 %, que se puede considerar como aceptable.

Intensidad luminica	Patrón		Dispositivo		E(%)
	M.(μ)[lx]	D.(δ)	M.(μ)[lx]	D.(δ)	
Max	194.39	0.11	187.3	0.48	3.64
High	143.55	0.08	137	1.05	4.56
Medium	98.69	0.05	93.1	0.31	5.66
Low	45.99	0.32	42.2	0.42	8.98

Tabla 3: Mediciones de la calibración del sensor BH1750

2.4.3. Calibración del sensor de nivel de humedad HW390

El HW390 es un sensor análogo y activo que trabaja bajo el principio de la capacitancia. A pesar de no tener una función de transferencia definida, se calculó una a partir de el uso de un patrón, que en este caso fue un dispositivo para supervisar plantas, capaz de medir la humedad, temperatura y el nivel de iluminación. A partir de un proceso similar a la calibración se obtuvo el siguiente modelo matemático para obtener el nivel de humedad en función del voltaje del sensor:

$$H[\%] = -103.77 \ln(v) + 88.77$$

donde v es el voltaje de salida del sensor. Esta función fue obtenida a partir de la aproximación lineal de lo puntos generados en el proceso mencionado anteriormente.

2.4.3.1 Metodología

Para comprobar esta caracterización, se tomaron 10 medidas consecutivas a una maceta con tierra seca, a la cuál se le fue agregando agua de forma progresiva hasta alcanzar la saturación. Al final se obtuvieron muestras en 7 diferentes niveles de concentración.

2.4.3.2 Resultados

En la figura 7 se muestra una gráfica con los mismos elementos mostrados en la figura 5. En este caso, es muy visible la diferencia entre el patrón y el dispositivo. La tabla 4 hace más clara esta diferencia. Podemos ver que la diferencia más grande es del 70.9 % mientras que el promedio es de 12.9 %.

3. Resultados

Se desarrollo un prototipo conformado por 4 nodos (dispositivos de medición) montados sobre tarjetas impresas, y encapsulados por carcasas de plástico, un servicio web montado en la infraestructura de Microsoft Azure, una integración con Google Home y una aplicación móvil. Con estos cuatro elementos

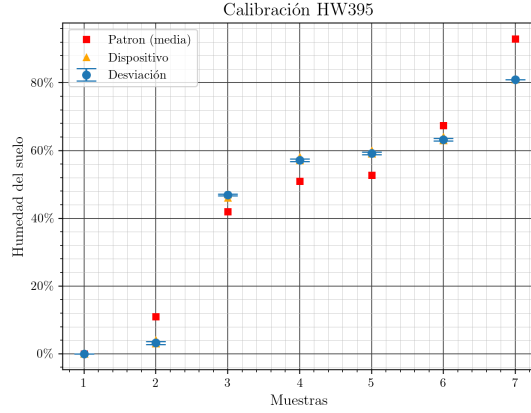


Figura 7: Mediciones del patrón y el dispositivo para la calibración del sensor HW390

Patrón		Dispositivo		Error(%)
M.(μ)[H %]	D.(δ)	M.(μ)[H %]	D.(δ)	
0	0.0	0	0.0	0
11	0.0	3.2	0.42	70.9
42	0.0	46.9	0.32	11.7
51	0.0	57.2	0.42	12.2
52.7	0.48	59.2	0.42	12.3
67.4	0.52	63.2	0.42	6.2
93	0.0	81	0.0	12.9

Tabla 4: Mediciones de la calibración del sensor HW390

se logró implementar un sistema que permitió orientar a los usuarios a tener un mejor cuidado de sus plantas, ofrecer datos sobre las condiciones historicas de sus plantas, así como advertencias preventivas y correctivas sobre condiciones desfavorables para sus vegetales.

4. Conclusión

Con la llegada de los dispositivos que manejan el principio del internet de las cosas (IoT), se ha incrementado el número de computadoras que se encuentran entrelazados a diferentes actividades realizadas en la vida diaria de las personas. El desarrollo de arquitecturas computacionales como RISC o ARM ha permitido que el costo de estas uniades de procesamiento reduzca y permita utilizar un mayor poder computacional a un menor costo. Adicionalmente, la búsqueda de la sustentabilidad y la soberanía alimenticia de cara al calentamiento global y otros fenómenos globales, ha revitalizado el interes sobre la agricultura a menor escala. Bajo estas directrices es que el proyecto logró desarrollar un prototipo capaz de guiar a las personas interesadas en cuidar cultivos de plantas o árboles, cuya experiencia sea poca o nula.

Adicionalmente, el uso de un asistente virtual como Google Home representa un paso adelante con relación a otros dispositivos de este tipo, además de que el hardware que se diseñó, puede jugar diferentes roles de forma que se pueden acomodar de forma flexible. Si bien, el conjunto de vegetales con el que cuenta soporte el sistema es limitado, este está diseñado para poder agregar nuevas plantas sin necesidad de hacer grandes cambios.

Reconocimientos

Los Autores agradecen a la Escuela Superior de Cómputo del Instituto Politécnico Nacional por el apoyo recibido y las facilidades otorgadas para el desarrollo del presente trabajo terminal

Referencias

- [1] Kevin Ashton. “That Internet of Things Thing”. En: *RFID Journal* 22.7 (2009), págs. 97-144.
- [2] Deloitte Insights. *The Internet of Things: A technical primer*. Inf. téc. Deloitte, 2015.
- [3] Nigel Dunnett y Muhammad Qasim. “Perceived benefits to human well-being of urban gardens”. En: *HortTechnology* 10.1 (2000), págs. 40-45.
- [4] Ishwarbhai C Patel. “Rutgers urban gardening: A case study in urban agriculture”. En: *Journal of agricultural & food information* 3.3 (1996), págs. 35-46.
- [5] Erendira Juanita Cano Contreras. “Huertos familiares: un camino hacia la soberanía alimentaria”. En: *Revista Pueblos y fronteras digital* 10.20 (2015), págs. 70-91.
- [6] *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors*. Texas Instruments. Dic. de 2017. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>.
- [7] *BH1750FVI Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC*. Rohm Semiconductor. Nov. de 2011. URL: <https://www.mouser.com/datasheet/2/348/bh1750fvi-e-186247.pdf>.