



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE MUROS VERDES INTELIGENTES
PARA MONITOREO DE CONDICIONES AMBIENTALES**

TESINA

QUE PARA OBTENER EL:

GRADO DE ESPECIALISTA

EN:

ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA

PRESENTA:

Maximiliano Adair Méndez Serrano

DIRECTOR DE TESINA: **M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose**



[CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX

2024]

Índice

| | |
|--|----|
| Introducción | 2 |
| 1. Antecedentes | 3 |
| 2. Marco teórico | 5 |
| 2.1. Contaminación | 5 |
| 2.2. Radiación ultravioleta | 6 |
| 2.3. Microclima | 7 |
| 2.4. Fenómeno de isla de calor | 7 |
| 2.5. Muros verdes | 8 |
| 2.5.1. Vegetación empleada en sistemas de muros verdes | 10 |
| 2.6 Microcontroladores | 10 |
| 2.7 Internet de las cosas (IoT) | 11 |
| 3.Estado del arte | 12 |
| 3.1 Conocimientos de frontera | 12 |
| 3.2 Sistemas utilizados actualmente en México | 14 |
| Ecoyaab mi jardín urbano | 14 |
| Tequiero Verdemx | 15 |
| Generación Verde | 16 |
| Plántica ciudades vivas | 16 |
| Vía Verde | 17 |
| 4. Diseño del sistema | 20 |
| 4.1. Diseño del sistema de monitoreo | 21 |
| Hardware del sistema | 21 |
| Software del sistema | 29 |
| 4.2. Diseño del sistema hidráulico | 32 |
| 4.3. Diseño del sistema de muro | 33 |
| 5.Construcción del sistema | 33 |
| 5.1 Elaboración de jardineras | 33 |
| 5.2 Preparación del software Enviro Grow | 37 |
| 5.2.1 Adafruit IO | 42 |
| 5.3 Preparación de cableado | 44 |
| 5.4 Adicionamiento de tarjeta Enviro Weather | 46 |
| 5.5 Realización de pruebas | 47 |
| 5.6. Colocación del sistema | 50 |
| 6. Procesamiento de datos | 51 |
| 6.1. Mediciones directas desde la tarjeta Enviro | 51 |
| 6.2. Mediciones de Adafruit IO | 52 |
| 6.3. Unidades de las mediciones | 53 |
| 7. Mantenimiento del sistema | 54 |
| 8. Análisis del prototipo | 56 |
| 8.1. Análisis económico | 56 |
| 8.2. Áreas de oportunidad | 57 |
| 9. Conclusiones | 59 |
| Bibliografía | 60 |

Introducción

Los problemas que se tienen en las grandes ciudades son variados y cada vez son más fáciles de reconocer junto con sus afectaciones a la calidad de vida de los habitantes de las grandes urbes, como son: la contaminación atmosférica, el ruido, el uso desmedido del agua, etc. Estos problemas pueden ser atacados desde diversos frentes entre los cuales se encuentran los proyectos de Naturación Urbana (Fernández Cañero, Pérez Urrestarazu, & Franco Salas, 2015).

La naturación urbana es la acción de incorporar o fomentar la naturaleza mediante la recuperación de la flora y fauna autóctonas de una manera aceptable y sostenible; sus sistemas se pueden clasificar de acuerdo con la superficie de edificación utilizada, ya sea si se trata de azoteas o tejados; o bien si se trata de muros o paredes (Urbano-López de Meneses, 2013).

Para el caso de los muros naturados, estos se les conoce por diferentes nombres, como lo son fachadas verdes, muros verdes, muros vivientes y jardines verticales. Todos estos términos son aceptados para referirse a superficies naturadas de manera vertical (Guzmán Flores, 2017).

El objetivo de este trabajo es el de diseñar un sistema de muros verdes en el que se implemente un sistema de monitoreo para el ambiente en un nivel de microclima mediante microcontroladores, que permitan recibir la información relevante para el manejo y cuidado del sistema de la parte biótica, y para conocer las condiciones ambientales, tales como humedad, temperatura del ambiente y calidad de aire, lo que está en función de la disponibilidad de sensores comerciales.

Los objetivos particulares son los siguientes:

- Revisar los distintos tipos de sensores aptos a incorporarse al sistema de muros verdes.
- Plantear alternativas de instalación mediante esquemas indicativos para el dispositivo.
- Plantear un prototipo conceptual de muro verde con un sistema de monitoreo integrado.

En el **Capítulo 1: Antecedentes** se describe la razón por la cual es importante la implementación de un sistema de muros verdes.

En el **Capítulo 2: Marco teórico** se realiza la conceptualización de los muros verdes, los términos de contaminación relevantes ante los muros verdes y la información importante de informática para la implementación del sistema de monitoreo.

En el **Capítulo 3: Sistemas utilizados actualmente en México** se realiza el estado del arte de los muros verdes, mostrando las principales compañías con sus respectivos sistemas y ejemplos de su instalación.

En el **Capítulo 4: Diseño del sistema** se realiza el diseño del sistema el cual se divide en tres partes: sistema de monitoreo, hidráulico y de muro.

En el **Capítulo 5: Construcción del sistema** es llevado a la realidad el módulo del sistema de muros verdes.

En el **Capítulo 6: Procesamiento de datos** se muestra como manejar los archivos provenientes de las mediciones del sistema, así como las adecuaciones que se tiene que realizar antes de poder usarlos.

En el **Capítulo 7: Conclusiones** se muestran las conclusiones a las cuales se llegó con esta tesina.

1. Antecedentes

Actualmente las poblaciones de los países desarrollados tienden a consolidarse en asentamientos en los cuales se le da la preferencia a la infraestructura para el ser humano mediante la transformación de la naturaleza, y al realizar esto, se realiza un desfase con el balance que se tenía en el medio ambiente, y si no se llegan a tomar medidas de mitigación adecuadas se genera una pérdida importante de la naturaleza, lo cual conlleva afectaciones al ser humano ya que este es una parte del medio ambiente.

Es en las grandes urbes, donde se puede notar con mayor facilidad este desbalance entre las áreas verdes y el resto que están destinadas para construcciones donde pueda habitar el ser humano. En estas situaciones, se pueden observar las afectaciones generadas como son la pérdida de la biodiversidad, el incremento de temperatura o la disminución de la infiltración del agua.

En el caso del incremento de la temperatura se debe principalmente a un origen antropogénico dentro de las ciudades, ya que en ellas se genera calor debido al uso de los vehículos y medios de transporte, las plantas de energía, sistemas de aire acondicionado, etc. También se debe a que los principales materiales constructivos que se han utilizado por décadas han sido materiales con una capacidad

térmica superior al del terreno natural, lo que provoca que almacenen la energía irradiada por los rayos solares por mayor tiempo (Rizwan, Dennis, & Liu, 2007).

Este incremento en la temperatura genera que el ser humano no pueda sentirse cómodo dentro de las edificaciones, y para mitigar esto, requiere de la implementación de nuevos sistemas que puedan ayudar a recuperar el confort en las edificaciones, como lo es la adopción de sistemas de aire acondicionado, el cual implica un aumento en el consumo energético o de sistemas pasivos, como los son los sistemas de naturalización urbana como las azoteas naturalizadas y los muros verdes.

Estos sistemas de naturalización entran en las denominadas soluciones basadas en la naturaleza (NbS), las cuales son acciones para proteger, manejar sustentablemente y restaurar ecosistemas naturales o modificados. Al incorporarse estas soluciones, se puede promover la conectividad entre los ecosistemas locales y aumentar la resiliencia de los mismos (Gionfra, Kelder, Aivalioti, & Caitlin, 2023).

En el caso de los sistemas de naturalización, se requiere un constante mantenimiento para garantizar un funcionamiento adecuado, ya que al tratarse de organismos vivos, se les debe de tener en condiciones óptimas de desarrollo para mantener su existencia y poder obtener los beneficios que estos nos pueden brindar en una relación simbiótica. Debido a lo anterior, se requiere conocer en qué condiciones se encuentra la vegetación, saber si poseen la cantidad suficiente de agua, si reciben la cantidad correcta de luz para su desarrollo o inclusive, si están en temperaturas adecuadas para su crecimiento.

Por las razones anteriormente mencionadas, es conveniente la implementación de un sistema de monitoreo en los sistemas de naturalización, y especialmente en el caso de los muros verdes, ya que estos sistemas se dificultan su acceso en comparación al de las azoteas naturalizadas. Además este sistema de monitoreo se puede implementar a la vez de un sistema de control que regule la recirculación del agua, basándose en el nivel de humedad del suelo de las plantas, o si puede informar a los propietarios del muro de situaciones que puedan afectar al sistema, este puede reducir los costos de mantenimiento debido al ahorro del reemplazo de vegetación por tener un mejor cuidado y conocimiento del sistema.

Por otro lado, es importante la adquisición de datos relevantes para las condiciones ambientales, ya que éstas, son los parámetros con los cuales se puede establecer un patrón de medida para conocer

como está afectando un sistema de naturación, como son los muros verdes a su entorno. Esta información puede ser recabada de fuentes oficiales, como es en el caso de México que se cuenta con una red de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS), las cuales muestra información almacenada de hasta 30 días de cada estación.

Sin embargo, esta información abarca un área bastante amplia, puede que no se puede aplicar correctamente como medida patrón, por lo que una alternativa sería tener un propio sistema de medición que pueda tomar la información de las condiciones relevantes para una zona de estudio a nivel del microclima de una edificación.

Si un sistema de muros verdes posee un sistema de monitoreo ambiental que pueda ser almacenado, se podrá tener un registro de las condiciones ambientales del microclima circundante y si se compara con otros registros, se podrá observar cómo ha beneficiado la implementación de éste en el microclima.

2. Marco teórico

2.1. Contaminación

La contaminación se puede definir como la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes, o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico, se define como contaminante a toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural (DOF, 2023).

El desequilibrio ecológico se puede definir como la alteración de las relaciones de interdependencia entre los elementos naturales que conforman el ambiente, que afecta negativamente la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos (DOF, 2023).

En el caso de la contaminación atmosférica, esta se define como la presencia en la atmósfera de uno o más contaminantes o sus combinaciones, en cantidades tales y con tal duración, que puedan afectar la vida humana o puedan ser perjudiciales para la vida vegetal, animal o del ambiente (Sánchez Salinas, Ortiz Hernández, & Castrejón Godínez, 2014).

Hay tres tipos de clasificaciones para los contaminantes del aire: por su estado físico (gases y partículas), su composición química y su origen (primarios y secundarios). En el caso de la

composición química se divide en compuestos que contengan nitrógeno, azufre, carbono, oxidantes fotoquímicos y compuestos halogenados.

Para las partículas, se clasifica por tamaños en cinco grupos: partículas suspendidas totales (menores a 100 micras), partículas respirables o también conocidas como PM_{10} (menores a 10 micras), partículas respirables gruesas (de 2.5 a 10 micras), partículas respirables finas o $PM_{2.5}$ y partículas respirables ultrafinas (menores a 0.1 micras) (Vázquez González, y otros, 2020).

Otra contaminación importante en las grandes ciudades es la contaminación por ruido, esta puede ser definida como aquel sonido no deseado que resulte molesto o desagradable. Otra definición puede ser el conjunto de sonidos de diferentes frecuencias que resulten desagradables para el oído humano (López Jiménez, 2018). Por otro lado, la LGEEPA (Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente) la define como todo sonido generado por actividades humanas que, por su intensidad, duración o frecuencia, implique riesgo, molestia, perjuicio o daño para las personas, para otros seres vivos o para el ambiente (DOF, 2023). Las principales fuentes generadoras de ruido en las ciudades son el tránsito vehicular, aéreo y ferroviario; así como el ruido de fábricas y el generado en oficinas.

Dentro de los daños a la salud que son generados por la exposición a altos niveles de ruido. se tienen dos grupos: daños directos, en los que se encuentra la pérdida de capacidad auditiva y el desplazamiento del umbral, de manera temporal o permanente, el cual causa una sensación de aturdimiento o de tener tapados los oídos, y los daños indirectos como trastornos del sueño, disminución de la concentración, afectaciones psicológicas y afectaciones al sistema inmunológico. (López Jiménez, 2018).

2.2. Radiación ultravioleta

La región ultravioleta del espectro electromagnético de la luz va desde los 100 a 400 nm y se divide en tres bandas: UVA (315 a 400 nm), UVB (280 a 315nm) y UVC (100 a 280 nm). Cuando los rayos del sol ingresan a la atmosfera toda la radiación UVC y cerca del 90% de la radiación UVB es absorbida, por lo que la radiación ultravioleta que llega a la superficie de la tierra esta compuesta principalmente por radiación UVA y un poco de UVB (WHO, 2002).

Dentro de los factores que influyen en la radiación UV son: latitud, altitud, elevación solar, nubosidad, la presencia de ozono en la atmosfera y la reflexión del suelo.

Cuando se tiene una exposición prolongada a la radiación UV se presentan afectaciones en la salud de los seres humanos, como lo son los cánceres de la piel. Debido a estas afectaciones la Organización Mundial de la Salud creó el índice UV, el cual describe la intensidad de la radiación ultravioleta que tiene efectos relevantes en la piel humana (WHO, 2002).

El valor del índice debe ser redondeado al entero más cercano y se puede clasificar en los siguientes rangos:

- Nivel bajo (1 a 2): no se requiere de protección.
- Nivel medio (3 a 5): se empieza a requerir de protección solar.
- Nivel alto (6 a 7).
- Nivel muy alto (8 a 10): se empieza a requerir de protección solar reforzada.
- Nivel extremo (de 11 en adelante).

2.3. Microclima

Al conjunto de estados de tiempo atmosférico que se producen en una determinada región y que otorgan a ésta una particularidad que la separa del resto, se le puede definir como clima (Fundación española ciencia y tecnología, 2004).

El microclima se puede definir como: “El clima que prevalece a una escala de nivel micro”, la escala de nivel micro, abarca desde un centímetro hasta un kilómetro y ésta comparte el rango de cien metros hasta un kilómetro con la escala local o urbana. En el caso del microclima urbano, resulta de interés los efectos que pueden generar los edificios, desde la presencia o ausencia de árboles, balcones, el material de recubrimiento, etc.; ya que estos pueden modificar la reflexión solar o el flujo del viento (Erell, Pearlmutter, & Williamson, 2011).

2.4. Fenómeno de isla de calor

El fenómeno de la isla de calor es un fenómeno de origen térmico, en el que se presenta una diferencia de temperatura en zonas urbanizadas, tendiendo a ser más elevada su temperatura durante la noche. Y la zona donde se presenta con mayor intensidad este fenómeno, es en el centro de las ciudades, debido a que es donde se realiza la edificación masiva.

Dentro de los factores que lo propician, son el tipo de materiales utilizados en las construcciones de las ciudades, como lo son el concreto y el asfalto, ya que estos materiales tienen un menor valor de

conducción térmica, provocando que almacenen el calor por mayor tiempo y lo liberen lentamente (Loera Saldivar, 2023).

De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) la intensidad de las islas de calor varía en un rango de 1.1 a 6.5°C y para el caso de las ciudades que tienen una gran extensión y su población supere un millón de habitantes, se puede observar un incremento en la temperatura del microclima circundante a la zona urbanizada en un rango de 1 a 12°C.

La vegetación posee la capacidad de reducir la temperatura del aire hasta un total de 5°C y para una ciudad, que se puede considerar húmeda se estima que la temperatura promedio máxima puede reducirse entre un 3.4 a 10°C utilizando sistemas de naturación verticales (Herath, Halwatura, & Jayasinghe, 2018).

2.5. Muros verdes

Un muro verde es considerado como un sistema que cuenta con materiales y tecnología para cubrir las superficies de una edificación de manera que sea sofisticada, ordenada y proteja de la intemperie (Noria Govea & Pérez Rivas, 2020). Estos son el resultado de enverdecer superficies verticales con plantas, con la finalidad de cubrir los edificios con vegetación, ya sea con plantas enraizadas en el suelo, en la pared en sí o en jardineras ancladas (Guzmán Flores, 2017).

Uno de los primeros sistemas de este tipo conocido como pared viviente o por sus siglas en inglés LWS puede estar constituido por las siguientes componentes:

- Estructura de acero para acoplamiento al muro
- Panel Aislante
- Sustrato
- Especies vegetales

Los sistemas LWS son empleados con el objetivo de proteger a la edificación y por los beneficios que conlleva como la mejora estética del edificio, menor consumo energético, aislamiento acústico, entre otros.

Los muros verdes pueden ser clasificados de diferentes maneras, como: su funcionamiento, los elementos que lo conforman, su forma de instalación, etc. Estas clasificaciones permiten la

distinción de un sistema a otro, y, con el constante desarrollo e implementación de nuevos mecanismos o formas de construcción, se crean nuevas formas de clasificarlos. (Noria Govea & Pérez Rivas, 2020)

Una de las divisiones que se pueden hacer a los sistemas de muros verdes, es en cuatro categorías: árbol establecido contra la pared (Que en sí no son realmente sistemas de muros verdes, pero sus beneficios son los mismos), enredaderas y/o trepadoras, colgantes y modular.

Los sistemas de muros verdes colgantes están hechos por plantas con pedicelos largos en los balcones o en la parte superior de los edificios, mientras que los modulares, consisten en vegetación plantada en módulos que tengan un medio de crecimiento propio y que se puedan reemplazar fácilmente (Riva Sánchez, 2019)

Los beneficios que brindan los sistemas de muros verdes son diversos, entre ellos, se encuentra la mejoría de la calidad del aire, la reducción del efecto isla de calor, evapotranspiración y reducción de ruido.

Los muros verdes poseen la capacidad de absorber los contaminantes, como CO₂, NO₂ y las concentraciones de material particulado suspendido, esto es logrado mediante la aportación de las plantas y sus microorganismos que pueden depurar el aire atrapándolos.

En cuanto a su reducción del efecto de isla de calor, los sistemas reducen las temperaturas debido al intercambio de calor convectivo entre el follaje de la pared cubierta y el aire; y a la realización de intercambios de calor radiactivo debido a las superficies vegetales, ya que éstas dan lugar a la redistribución de la radiación causando que los intercambios de este tipo de calor sean menores.

La evapotranspiración es un proceso que esencialmente crea un efecto de enfriamiento en el entorno, ya que la vegetación absorbe el calor solar y evapora el agua por medio de funciones biológicas y metabolismo. La evapotranspiración consta de dos componentes: evaporación y transpiración, pero resulta de interés la transpiración más que la evaporación, debido a que la evaporación es la transferencia de agua del suelo al aire, pero, en ciertos sistemas de muro verde no se cuenta con un sistema de suelo o sustrato; y la transpiración tiene lugar en las hojas y el cuerpo de la vegetación y es la liberación del vapor de agua (Noria Govea & Pérez Rivas, 2020).

Los sistemas de muros verdes generan una reducción de ruido ya que la vegetación genera la función de una barrera acústica. La forma en que interactúan las ondas sonoras y la vegetación ocurre principalmente de tres maneras: reflexión, difracción y difusión (López Jiménez, 2018).

Existen un estudio por Wong et. Al (*Quantitative hydrologic performance of extensive green roof under humid-tropical rainfall regime*, 2014) en el que se determinó el coeficiente de absorción del sonido de una pared verde en una cámara de reverberación y, se concluyó, que el coeficiente de absorción del sistema de vegetación estudiado tiene valores más altos que los de otros materiales de construcción y mobiliario (Noria Govea & Pérez Rivas, 2020) .

2.5.1. Vegetación empleada en sistemas de muros verdes

Dentro de las recomendaciones que se tienen para la vegetación empleado en estos sistemas se encuentra que se debe considerar que la vegetación tenga pocas necesidades de riesgo, adaptarse a las condiciones locales y el uso de plantas nativas (Noria Govea & Pérez Rivas, 2020) .

La vegetación que puede ser empleada para los sistemas de muros verdes se puede clasificar en base a la cantidad de requerimiento lumínico, en base a esto se pueden agrupar en dos grupos: plantas de sombra o interior y plantas de exterior.

Para el caso de las plantas de interior se encuentran los helechos, los anturio y los filodendros; mientras que para las de exterior se tiene que casi cualquier tipo planta de sol se adapta al crecimiento en fachada vegetal tomando en consideración sus requerimientos de tamaño, solo que se debe tener especial cuidado en considerar las horas de luz solar directa que reciben. Algunos ejemplos de plantas que sirven para exterior son la familia de las suculentas que, por sus condiciones de crecimiento, se facilita su uso en estos sistemas.

Las suculentas requieren menor mantenimiento y contribuyen a la minimización del peso del sistema de muros y se trata de especies tolerantes a la sequía, pero su apariencia estética, solo es recomendable para uso en muros pequeños, ya que estas adquieren una apariencia plana a diferencia de otras especies (Riva Sánchez, 2019).

2.6 Microcontroladores

Se puede definir a una computadora digital, como un dispositivo electrónico que puede realizar millones de cálculos por segundo, para procesar un gran volumen de datos, ejecutando una lista de

instrucciones. Para que algún dispositivo se le pueda considerar como una computadora, requiere de un conjunto de tres unidades funcionales: una unidad central de procesamiento o CPU, una unidad de almacenamiento y una unidad de entrada y salida.

Las computadoras son herramientas con propósitos generales, se pueden usar para diversas tareas y se pueden modificar si es que no cumplen con las especificaciones requeridas, pero, en el caso de los microcontroladores no es de esta manera. Un microcontrolador se puede definir como un circuito integrado programable para un uso específico, en el cual se encuentran las tres unidades funcionales de una computadora.

También se debe de considerar que un microcontrolador, posee una arquitectura cerrada porque sus unidades funcionales se encuentran dentro de un mismo chip ya programados con el propósito específico que fueron diseñados y residen en un sistema en el cual se van a manejar (González Betancourt, 2011) .

2.7 Internet de las cosas (IoT)

El internet de las cosas o por sus siglas en inglés “IoT” ha sido llamado una de las componentes de la cuarta revolución industrial, pero su definición no es algo concreto. Desde la primera vez que se utilizó el término en el año de 1999, por Kevin Ashton, solo se definió como un sistema donde los objetos del mundo físico fueran conectados a Internet para automatizar la obtención de datos.

Otra definición, dada por la Unión Internacional de Telecomunicaciones, es que el IoT, se trata de una infraestructura global, que permite servicios avanzados mediante la interconexión de las cosas físicas y/o virtuales, cuya finalidad es la realización de un intercambio de información y procesamiento de información (Barrio Andrés, 2018) .

Dentro de los rasgos característicos de los elementos de IoT, se pueden definir los siguientes:

- Comunicación y cooperación. Los objetos que formen parte del IoT deben de tener la capacidad de estar conectados a alguna red con otros dispositivos.
- Identificación. Los objetos deben de ser identificables de forma única, incluso los objetos que no posean información electrónica pueden ser identificados mediante el uso de códigos de barras o QR.
- Direccionamiento. Los objetos deben de ser ubicados y poder ser manejados remotamente.

- Detección. Los objetos pueden recopilar información sobre su entorno con sensores y pueden reenviar los datos o actuar en base a la información detectada.
- Actuación. Los objetos pueden contener actuadores para ser manipulados en el mundo físico mediante forma remota.
- Procesamiento de información integrada. Los objetos inteligentes pueden contar una capacidad técnica de un procesador o de un microcontrolador.
- Localización y rastreo. Los objetos inteligentes pueden conocer su ubicación física o ser georreferenciados.
- Interfaces de usuario. Los objetos inteligentes pueden comunicarse con los usuarios de manera directa o a distancia.

3.Estado del arte

3.1 Conocimientos de frontera

En un estudio realizado por los investigadores Hanniel Yakubu y Regina Reine (2019) se decidió implementar tecnologías de IoT en dos sistemas de muros: uno sin recubrimiento vegetal y otro con recubrimiento vegetal; esto con la finalidad de poder realizar el análisis del rendimiento del sistema durante tres días.

Los resultados a los que llegaron fue una diferencia de temperatura cercana a los 7.6°C entre los muros, siendo el muro con recubrimiento vegetal el de menor temperatura, en cuanto a la humedad, se tuvo un incremento del 23% en el muro con recubrimiento vegetal (Yakubu & Reine, 2019). En cuanto a la implementación de los sensores con IoT, se observó que estos funcionaban mejor cuando no se colocaban directamente a la luz solar y en cuestión de las baterías que lo alimentaban, se tuvo un incremento en el rendimiento y menores desconexiones cuando se cambiaron por baterías normales a tipo industriales.

Por otro lado, en el artículo “*Internet of Things and autonomous control for vertical cultivation walls towards smart food growing: A review*” (Halgamuge, y otros, 2021) se realizó una investigación de publicaciones entre los años 2004 a 2018, de la utilización de las tecnologías IoT en jardines verticales contemplando en ellos qué tipo de planta se utilizó, el tamaño y ubicación de los muros

verdes, la información recabada, el hardware utilizado, la fuente de energía, la frecuencia de la recolección de datos; entre otra información.

Dentro de los resultados a los que llegaron fueron los siguientes:

- Las plantas con las cuales se han realizado más estudios son la lechuga, el jitomate y plantas cuyas hojas son comestibles, encontrándose estas tres en un 48.4% de todas las publicaciones.
- Las fuentes de energía principales son las baterías, junto a las fuentes de corriente alterna, ambas con un 44% y solamente un 11.1% tuvieron una implementación de energía solar.
- Dentro de las mediciones de los sensores, se tuvo que un 22.5% medían la temperatura ambiental, un 21.1% la intensidad de la luz, un 14% los niveles de humedad del ambiente y solamente un 5.63% la humedad de los suelos; por otro lado, un 7% medía la nutrición del suelo y un 2.82% la temperatura del suelo. Estos porcentajes indican la decisión de implementación de cada sensor y no su relevancia de utilización.
- En cuanto a la frecuencia de las mediciones se tiene que la mayoría realizaba mediciones de 1 a 3 minutos (un 42.8%), mientras que en mediciones de 4 a 6 minutos solamente las usaban un 28.6%, y finalmente cada 30 minutos y una vez al día tuvieron un 14.3% cada una.
- Para la tecnología de la transmisión, se tuvo que los principales medios de comunicación fueron Zigbee y Wifi ambos con un 42.8% y el uso de paquetes de servicio de radio solamente fue implementada en un 12.4%.
- Para el almacenamiento de la información se tuvo que, el establecimiento de una base de datos en un servidor, en la nube y acceso remoto en plataforma tuvieron un 25% cada una y solo un 12.5% se guardaban en el mismo sistema.
- Finalmente en cuanto al medio de cultivo, se tiene que el principal medio de cultivo fue en base a suelo (un 42%) y la hidroponía tuvo un total del 38%.

De los estudios que se revisaron en el hardware cabe recalcar que solamente uno utilizo Arduino y solamente uno implemento la microcomputadora Raspberry Pi.

3.2 Sistemas utilizados actualmente en México



Figura 1 Sistema de muros verdes en construcción de Ecoyaab.
Obtenido de: <http://tinyurl.com/228azfv6>

Dentro del territorio mexicano, hay diversas empresas que se dedican a la fabricación y colocación de muros verdes, para la información recabada en esta tesina, se centra la investigación en las compañías ubicadas en la Ciudad de México, ya que siendo ésta la capital del país, es también una zona con un gran índice de urbanización.

Ecoyaab mi jardín urbano

Esta compañía, se trata de un despacho dedicado a la creación de espacios verdes sustentables, su especialización es en la creación e instalación de muros verdes. Fue fundada en el año de 2010, ya con más de 13 años de experiencia en el campo de los muros verdes.

Sus diversos sistemas de muros verdes constan de una amplia selección de especies vegetales, cuentan con un total de 700 especies disponibles para escoger en base a las condiciones del sitio en el que se colocaran (ubicación geográfica, la incidencia solar, los vientos y la humedad ambiental) y al gusto del cliente. Para su instalación, se colocan perfiles de acero sobre una pared y éstos son cubiertos posteriormente por una capa impermeable hecha de materiales reciclables, formando así una separación entre la pared y el sistema, evitando el paso de la humedad al muro.

Para la colocación de las especies vegetales se instalan dos capas de textiles sobre la capa impermeable, donde se permitirá el crecimiento de la vegetación, éstas capas son geotextiles hidropónicos llamados fieltro fitogenerante.

Finalmente su sistema de riego que cuenta con un sistema automático de nutrientes, un sistema de control y monitoreo de la cantidad de líquido que debe recibir la vegetación y un monitoreo wifi de la situación del sistema.

TequieroVerdemx



Figura 2 Ejemplos de proyectos de la compañía TequieroVerdemx. Obtenido de: <http://tinyurl.com/43shhs3w>



Figura 3 Módulos de plástico para muros verdes de la compañía TequieroVerdemx. Obtenido de: <http://tinyurl.com/43shhs3w>

Esta compañía se dedica a diversos proyectos de naturación urbana en los que se incluyen: muros verdes artificiales, muros verdes naturales, pasto sintético, azoteas naturales, proyectos de paisajismo, entre otros. Su sistema de muros verdes consiste en la colocación de paneles de 1x1.5 m en los cuales, dependiendo de la vegetación elegida se utilizan módulos de plástico, el cual se muestra en la figura 3, donde se coloca sustrato, o en caso de ser una vegetación de un tamaño pequeño, sólo se colocan en bolsas del mismo módulo, ambos modelos cuentan con un sistema de

riego propio.



Figura 4 Mantenimiento de muros verdes de Generación verde. Obtenido de: <http://tinyurl.com/z7tvzxda>

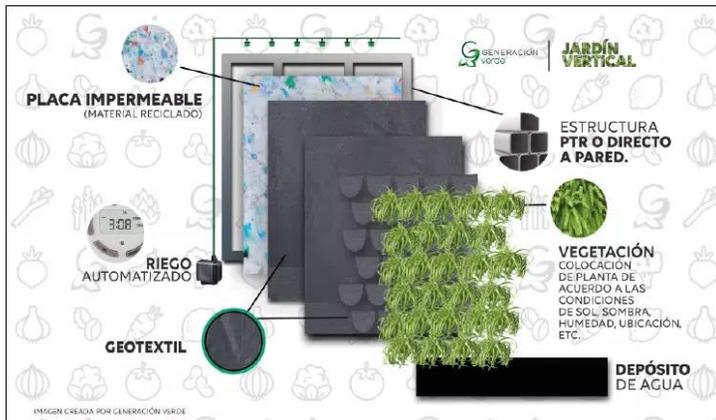


Figura 5 Esquema del sistema de muro verde de la compañía Generación verde. Obtenido de: <http://tinyurl.com/z7tvzxda>

Generación Verde

Esta compañía se enfoca en diversos proyectos de naturación urbana, como, la naturación de muros y azoteas, la realización de huertos urbanos y la realización de tareas de jardinería, paisajismo y mantenimiento.

Su sistema de muro verde se puede observar en la figura 5 y consta de 6 partes:

1. Estructura de soporte y sujeción
2. Almacenamiento y recuperación de agua de riego
3. Sistema de riego
4. Capa impermeable
5. Geotextiles y sustrato
6. Paleta vegetal

Plántica ciudades vivas

Esta compañía solo se centra en el desarrollo de jardines verticales, losas ajardinadas y azoteas verdes. Su sistema de muro verde o jardín vertical se muestra en la figura 6 y consta de las siguientes partes:

- Bastidor metálico
- Membrana impermeable,
- Sistema de riego
- IOT Plantica (Monitoreo en tiempo real del desempeño del muro verde)
- Vegetación.



Figura 6 Esquema del sistema de muro verde de la compañía Plantica Obtenido de: <http://tinyurl.com/4s4vx5c9>

Vía Verde

En el año 2017, el arquitecto Fernando Ortiz Monasterio, inició la propuesta de la colocación de muros verdes en las columnas que sostienen al segundo piso del periférico, y ese mismo año, comenzó la construcción de los muros verdes en 50 columnas, con un total de 23 400 plantas en cada columna, dando cada una un total de 65 metros cuadrados de área verde (Paisajismo Digital, 2019).

Su sistema de muro verdes consiste en irrigación a través de goteo automatizado, para el cual se utiliza el agua de lluvia que cae en el segundo piso del periférico, cuando no se tienen periodos de lluvia ,se utiliza agua tratada obtenida del drenaje del viaducto (Chávez, 2019).



Figura 7 Jardines verticales de vía verde. Obtenido de: <http://tinyurl.com/wz2kr9rt>

Dentro de cada columna, se tienen sensores de humedad, temperatura y nutrientes que sirven para conocer las condiciones de las plantas y esta información, es enviada a un centro de control donde se toman las medidas necesarias para mantener en buena condición el crecimiento de las plantas (Aristegui Noticias, 2019).

Para el recubrimiento de las columnas, se utilizó una membrana elaborada con botellas de PET, fabricada por internas del Centro Femenil de Readaptación Social Santa Martha Acatitla, generando una inclusión social de la población, ya que se brindó la capacitación para la generación de la membrana. Su sistema de crecimiento es hidropónico, dejando en el recubrimiento de PET bolsas donde se colocan las plantas, y para cada columna, se requirió un total de 6 890 botellas de plástico de 600 mililitros (Ramo, 2017).

Para el año 2019, se habían instalado los muros verdes en un total de 400 columnas dando un total de 65 000 metros cuadrados de áreas verdes colocadas, la meta final de vía verde es de 1 038 columnas y el proyecto había ganado un premio del WEF (Foro económico Mundial).

El sistema de Vía Verde actualmente se está exportando al extranjero en países como Guatemala, Costa Rica y España, siendo este último donde se tiene contemplado la implementación de 100,000 metros cuadrados en el periférico de Madrid (Lara, 2023).

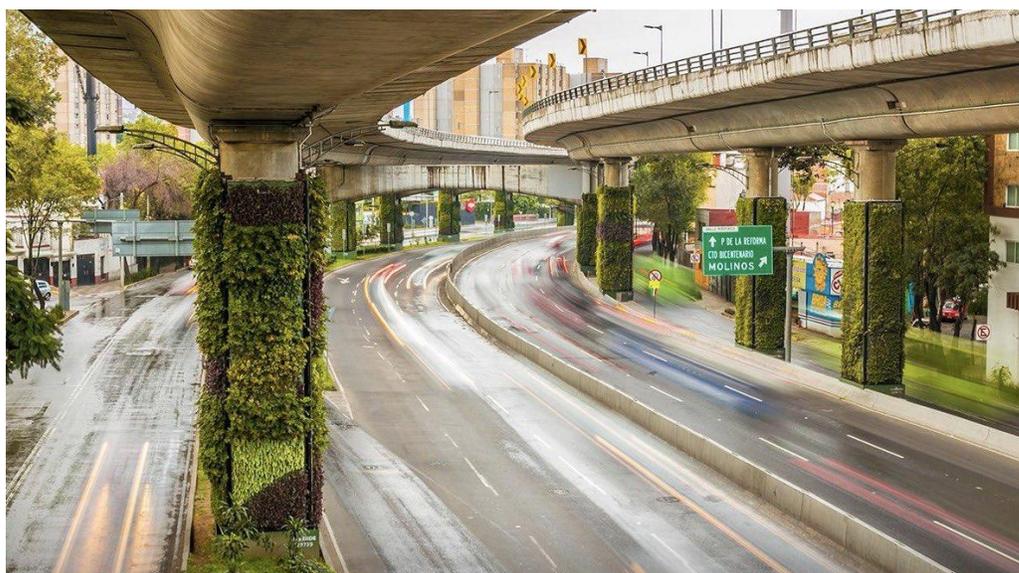


Figura 8 Columnas cubiertas de jardines verticales Vía Verde. Obtenido de: <http://tinyurl.com/32whahxh>

Agrupando las características de cada muro verde en la tabla 1:

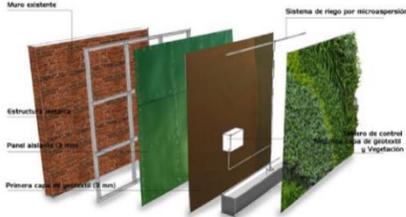
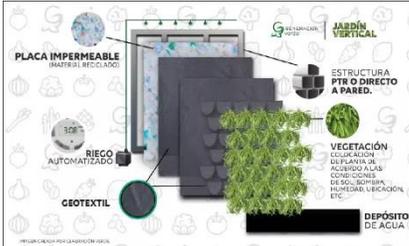
| Compañía | Servicios que brinda | Características de sus sistemas de muro verde | Fotografía o esquema de su sistema de muro verde |
|------------------|--|---|---|
| Ecoyaab | <ul style="list-style-type: none"> • Paisajismo Sustentable • Jardines Verticales • Lagos Artificiales • Azoteas Verdes | <ul style="list-style-type: none"> • Hidropónico • Riego automatizado • Materiales reciclados |  |
| TequieroVerdemx | <ul style="list-style-type: none"> • Muros verdes naturales • Muros verdes artificiales • Pasto sintético • Proyectos de paisajismo • Azoteas Naturales | <ul style="list-style-type: none"> • Sustrato • Sistema de riego temporizado |  |
| Generación Verde | <ul style="list-style-type: none"> • Jardines Verticales • Azoteas Verdes • Huertos Urbanos • Jardinería, Paisajismo y Mantenimiento | <ul style="list-style-type: none"> • Hidropónico • Sistema de riego automatizado • Captura de agua |  |
| Plántica | <ul style="list-style-type: none"> • Jardines Verticales • Azotea verde modular • Losa ajardinada • Paisajismo | <ul style="list-style-type: none"> • Hidropónico • Sistema de riego automatizado • IoT |  |
| Vía verde | <ul style="list-style-type: none"> • Jardines Verticales | <ul style="list-style-type: none"> • Hidropónico • Sistema de riego automatizado • IoT |  |

Tabla 1 Compañías que realizan muros verdes en México

4. Diseño del sistema

Para la realización del sistema, se separó el diseño en tres componentes que se puede apreciar en el diagrama 1:

1. Diseño del sistema de monitoreo: En esta sección se plantea el diseño de todo lo relacionado con la parte electrónica del sistema, como son la selección de los microcontroladores y sensores, la forma en que se conectan, como se muestra la información recolectada y la programación que deben de tener para su funcionamiento.
2. Diseño del sistema hidráulico: En esta parte se plantea el diseño de todo lo relacionado con el sistema hidráulico como son la selección de las tuberías, los accesorios, la entrada de agua al sistema y el manejo del agua.
3. Diseño del sistema de muro: En esta sección se realiza la culminación del sistema y se enfoca en el sistema de sujeción que tendrá el sistema, la selección de contenedor y/o sustrato, y la selección de la vegetación a emplear.

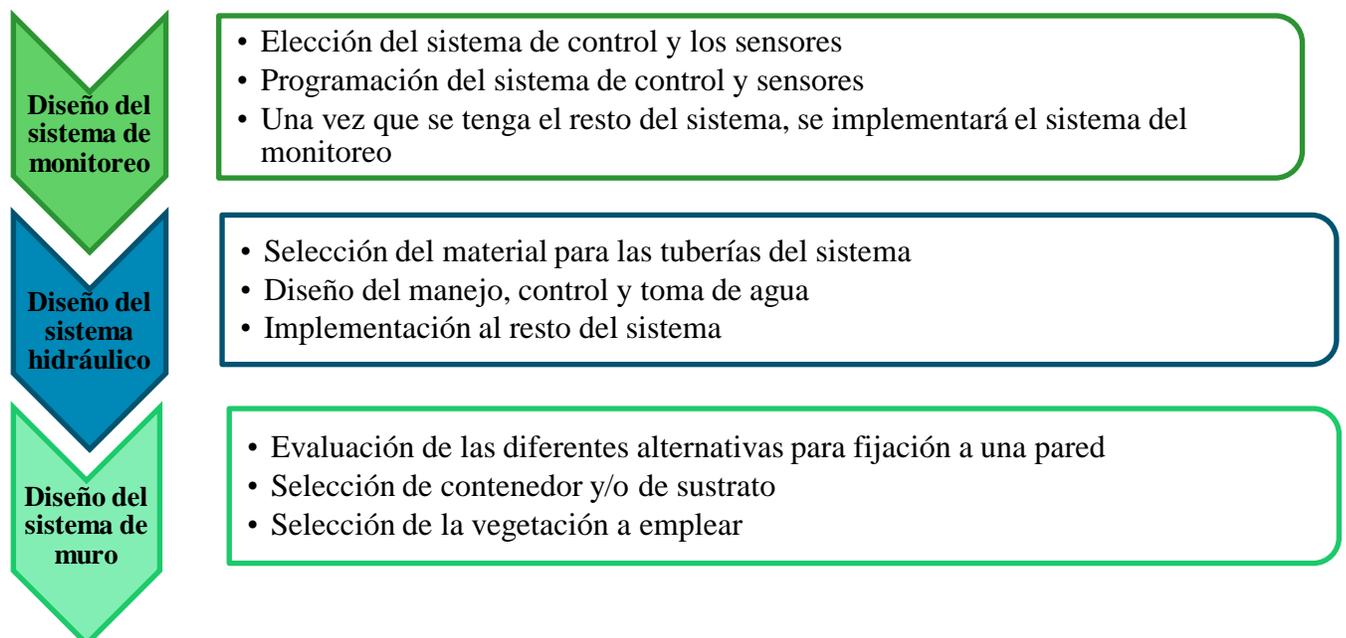


Diagrama 1 Orden del diseño del sistema

4.1. Diseño del sistema de monitoreo

Hardware del sistema

La parte central del sistema de monitoreo es el microcontrolador. al cual se le conectarán los diversos sensores y el sistema de bombeo para recirculación del agua, por ende, éste debe ser elegido considerando la mayor compatibilidad a otros sistemas, su facilidad de adquisición y su facilidad de implementación.

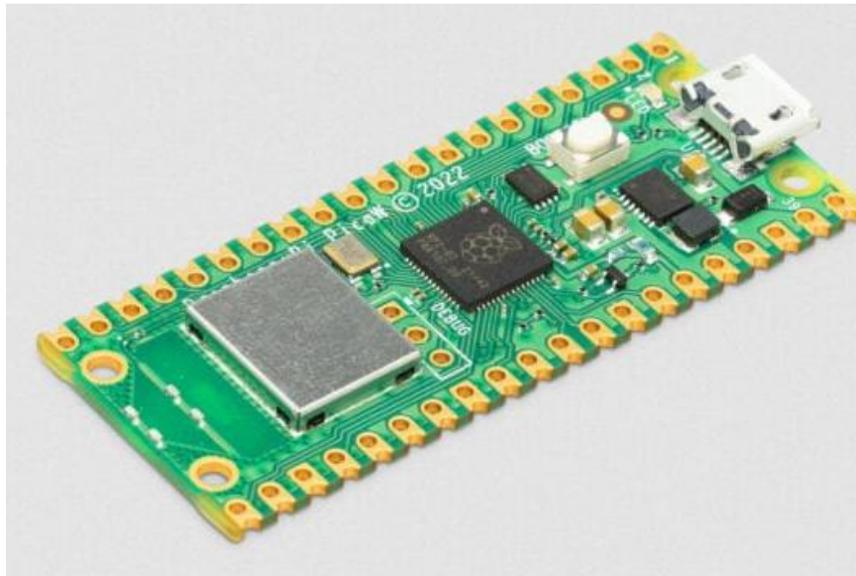


Figura 9 Raspberry Pi Pico W. Obtenido de: <http://tinyurl.com/8w7schtz>

Dentro del mercado de microcontroladores, se tienen diversas compañías que ofrecen una gran variedad de productos, pero actualmente dos sobresalen del resto: Arduino y Raspberry Pi. En el caso de Arduino, ha estado años en el mercado de los microcontroladores y se ha solidificado con su propia infraestructura de desarrollo de software y hardware, mientras que Raspberry Pi se había centrado en el desarrollo de computadoras de tarjeta única (SBC) hasta el año 2021 en el que fue sacada al mercado la Raspberry Pi Pico, la cual se puede definir como una tarjeta de desarrollo de microcontroladores, fue bien recibida en el mercado debido a la gran comunidad que Raspberry Pi ha cultivado y por su precio accesible de 4 dólares.

En un inicio esta tarjeta no contaba propiamente con conectividad de redes, pero en el año 2022 salió un modelo actualizado, llamado Raspberry Pi Pico W que se muestra en la figura 9, el cual cuenta con un chip que permite la conexión mediante bluetooth y Wi-Fi a la tarjeta, esto aumentó su precio solamente a 6 dólares (Upton, 2022).

Actualmente en México solo se tienen tres compañías que son revendedoras oficiales de la compañía de Raspberry Pi: 330 ohms, Geek Factory y AG Electrónica. Dentro del rango de precios que se vende la tarjeta es de \$105-\$195 dependiendo de si es el modelo original o el modelo “W” y si se tienen soldados *headers* en la tarjeta o no, los cuales facilitan la conexión de componentes electrónicos.

Tomando en consideración el precio de las tarjetas y la accesibilidad de implementación con otros sistemas de microcontroladores se optó por la elección de la Raspberry Pi Pico W como la tarjeta de microcontrolador que tendrá el sistema, una forma de referenciar a esta tarjeta es la de simplemente abreviar Raspberry a una R dejándola como RPi Pico W por lo que se utilizará en esta tesina para facilidad de lectura.

Dentro de las compañías que se dedican al desarrollo de tarjetas de expansiones para la RPi Pico W se encuentra la compañía Pi Moroni la cual ha sacado al mercado un grupo de tarjetas denominadas Enviro la cuales están enfocadas en el monitoreo ambiental. En la tabla 2 se muestran los modelos existentes de Enviro para RPi Pico W:

| Tarjeta | Sensores | Conexiones | Foto |
|----------------|--|---|--|
| Enviro Grow | Temperatura Presión Humedad Luz y Proximidad | QW/ST Sensores de humedad de suelo Sistema de bombeo Hidráulico |  <p>Figura 10 Enviro Grow. Recuperado de: http://tinyurl.com/yynv6j7y3</p> |
| Enviro Weather | Temperatura Presión Humedad Luz y Proximidad | QW/ST Sensores de lluvia y viento |  <p>Figura 11 Enviro Weather. Recuperado de: http://tinyurl.com/y26fwnxd</p> |

| Tarjeta | Sensores | Conexiones | Foto |
|---------------|--|------------|---|
| Enviro Indoor | Temperatura Presión Humedad Luz y Color Gases | QW/ST |  <p>Figura 12 Enviro Indoor. Recuperado de: http://tinyurl.com/yuwf6h5x</p> |
| Enviro Urban | Temperatura Presión Humedad Micrófono Partículas PM | QW/ST |  <p>Figura 13 Enviro Urban. Recuperado de: http://tinyurl.com/4cymuwHz</p> |
| Enviro + | Temperatura Presión Humedad Luz y Color Gases Micrófono | QW/ST |  <p>Figura 14 Enviro +. Recuperado de http://tinyurl.com/ye8kz6xi</p> |

Tabla 2 Modelos de tarjetas Enviro para RPi Pico W

De los modelos anteriores el que mejor cumple los requerimientos para el sistema es la tarjeta Enviro Grow debido a que posee una conexión a sistemas de bombeo de baja potencia para la recirculación de agua, así como conexiones a sensores de humedad de suelo que servirán como los accionadores del sistema hidráulico, esto en base a los requerimientos de la vegetación que posea el prototipo. Además con la presencia de un puerto QW/ST (que es un estándar de conexiones de



Figura 15 Sensores de lluvia y viento
Recuperado de: <http://tinyurl.com/mthb3z96>

diversos aparatos y sensores de microcontroladores) facilita la adición de un sensor adicional de ser requerido.

De manera auxiliar se puede integrar el modelo de la tarjeta Enviro Weather al sistema de monitoreo, ya que permite la adición de un anemómetro, un pluviómetro y una veleta, mostrados en la figura 10, para conocer el comportamiento de la lluvia y del viento de la zona de colocación del prototipo.

Dentro del catálogo de sensores que se pueden conectar mediante el puerto QW/ST se tienen los modelos mostrados en la tabla 3:

| Compañía | Nombre | Funcionalidad | Mediciones | Rango operacional | Rango de medición precisa | Precisión |
|-----------|-----------|--|--|--|--|--|
| Bosch | BME280 | Condiciones meteorológicas | Presión Humedad relativa Temperatura | Humedad 0-100% Presión 300-1100 hPa Temperatura -40 a 85°C | Humedad 20-80% Presión 300-1100 hPa Temperatura 0 a 65°C | Humedad ±3% Presión ±1.0 hPa Temperatura ±0.5 °C |
| Bosch | BME680 | Calidad del aire Condiciones meteorológicas | Presión Humedad relativa Temperatura VOC VSC | Humedad 0-100% Presión 300-1100 hPa Temperatura -40 a 85°C | Humedad 10-90% Presión 300-1100 hPa Temperatura 0 a 65°C | Humedad ±3% Presión ±0.6 hPa Temperatura ±1.0 °C |
| Bosch | BME688 | Calidad del aire Condiciones meteorológicas | Presión Humedad relativa Temperatura VOC VSC | Humedad 0-100% Presión 300-1100 hPa Temperatura -40 a 85°C | Humedad 10-90% Presión 300-1100 hPa Temperatura 0 a 65°C | Humedad ±3% Presión ±0.6 hPa Temperatura ±1.0 °C |
| Plantower | PMSA003I | Partículas | PM | 0.3-1.0 µm 1-2.5 µm 2.5-10 µm | Mayor a 0.5 µm | No disponible |
| Sensirion | SHT40 | Condiciones meteorológicas | Humedad Temperatura | Humedad 0-100% Temperatura -40 a 125°C | Humedad 25-75% Temperatura 0-75°C | Humedad ±1.8% Temperatura ±0.2°C |
| Rohm | BH1745NUC | Lumínico | Luminosidad | Temperatura -40 a 85°C | Luminosidad 0.005-40000 lx | ±0.005 lx |

| Compañía | Nombre | Funcionalidad | Mediciones | Rango operacional | Rango de medición precisa | Precisión |
|------------------------|-----------------|--|---|--|--|---|
| Rohm | BH1750FVI | Lumínico | Luminosidad | Temperatura -40 a 85°C Luminosidad 1 – 65535 lx | Luminosidad 1 – 65535 lx | ±0.005 lx |
| LITEON Optoelectronics | LTR-559-ALS-S01 | Lumínico | Luminosidad | Temperatura -30 a 70°C Luminosidad 1 – 65535 lx | Luminosidad 1 – 65535 lx | No disponible |
| LITEON Optoelectronics | LTR-390UV-01 | Lumínico | Luz ambiental Luz UVA | Temperatura -40 a 85°C | No especificado | ±25% Luz ambiental ±20% UVI |
| Sensirion | SCD30 | Calidad del aire Condiciones meteorológicas | CO ₂ Humedad Temperatura | CO ₂ 0-40000 ppm Humedad 0-100% Temperatura -40 a 85°C | CO ₂ 400-10000 ppm Humedad 0-100% Temperatura 0-50°C | CO ₂ ±30 ppm Humedad ±3% Temperatura ±0.4 °C |
| Plantower | PMS5003 | Partículas | PM | 0.3-1.0 µm 1-2.5 µm 2.5-10 µm | Mayor a 0.5 µm | 98% @ >=0.5µm |
| Sensirion | SGP30 | Gases | Etanol H ₂ | Etanol 0-1000 ppm H ₂ 0-1000 ppm TVOC 0-60000 ppb CO ₂ eq 400-60000 ppb | Etanol 0.3-30 ppm H ₂ 0.5-10 ppm | Etanol ±15% H ₂ ±10% |
| TDK InvenSense | ICP-10125 | Condiciones meteorológicas | Presión Temperatura | Presión 25-115 kPa Temperatura -40 a 85°C | Presión 95-115 kPa (1) 30-110 kPa (2) Temperatura 0 a 45°C (1) -20 a 65°C (2) | ±1.0 hPa (1) ±1.5 hPa (2) |
| Sensirion | SCD41 | Gases Condiciones meteorológicas | CO ₂ Temperatura Humedad | CO ₂ 0-40000 ppm Humedad 0-100% Temperatura -10 a 60°C | CO ₂ 400-5000 ppm Temperatura 15 a 35°C (1) -10 a 60°C (2) | ±40ppm ±0.8°C (1) ±1.5°C (2) |

Tabla 3 Sensores integrados en tarjetas compatibles con QW/ST

Entrando en detalle a los aspectos técnicos de Enviro Grow los sensores con los que cuenta son el BME280 y el LTR-559 cuyas características se encuentran en la tabla 3, mientras que la fuente de

alimentación es mediante una conexión de cables Jst-Ph con un voltaje máximo de 5.5 V el cual está diseñado para funcionar con un paquete compuesto por tres baterías doble A. También cabe la posibilidad de ser alimentado con dos baterías triple A si es que no se conectan sistemas de bombeo directamente a la tarjeta.



Figura 16 Mini bomba hidráulica sumergible Recuperado de: <http://tinyurl.com/ywkrw36y>

Las bombas hidráulicas compatibles con Enviro Grow como se mencionó anteriormente son de baja potencia y por consecuencia baja carga hidráulica, además que el voltaje máximo de salida de la tarjeta es de 3.4 V como es la bomba mostrada en la figura 16.

El modelo recomendado por Pimoroni es el de una mini bomba hidráulica sumergible con carga hidráulica máxima de 0.55 m cuyas dimensiones son de 43 mm de altura, 38.5mm de longitud y 25.5 mm de ancho; cuenta con cable de conexión Molex Picoblade 2P con una separación de 1.25mm con un diámetro de salida de 6.5 mm en su parte más angosta.

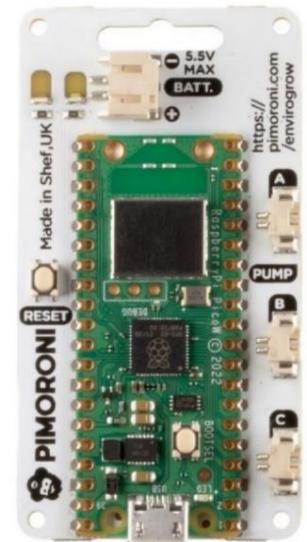


Figura 17 Reverso de tarjeta Enviro Grow. Recuperado de: <http://tinyurl.com/47mmj6fm>



Figura 18 Anverso de tarjeta Enviro Grow. Enviro Grow. Recuperado de: <http://tinyurl.com/y9v6j7y3>

Mientras que para los sensores que servirán de accionadores son los sensores de humedad para suelos. Estos sensores funcionan de manera capacitiva y están diseñados para ser resistentes a la corrosión, estos se conectan mediante cables de conexión Jst-Sh 3p y se muestran en la figura 19.

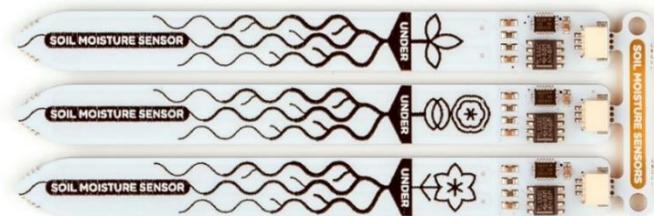


Figura 19 Sensores de humedad en suelos. Recuperado de: <http://tinyurl.com/y9kmr6ru>

En la estructura de Enviro Grow están denotadas las 3 entradas para sensores de suelo y bombas con las letras “A”, “B” y “C” las cuales son mostradas en las figuras 17 y 18; estas referencias son importantes para la programación del microcontrolador, ya que al tener tres conexiones se pueden tener tres diferentes

condiciones para solo una tarjeta. Por ejemplo si se tiene una vegetación que requiera de un sustrato completamente saturado mientras que otra solo requiera niveles bajos de saturación se puede hacer que el sistema cumpla con ambas condiciones por separado.

En cuanto al tema de la duración de la batería para la tarjeta esa se encuentra en un tiempo estimado de varios meses sin tener un número definido ya que dependiendo de las condiciones de uso y programación que se le dé puede aumentar o reducirse la vida de la batería.

Dentro de las condiciones que determinan su duración es qué tan frecuente se encuentra activo el sistema, debido a que este cuenta con una funcionalidad de *Deep Sleep*, la cual permite apagar la mayoría de las funciones y dejar solamente en funcionamiento la medición de tiempo para que después de un intervalo fijo se reactive totalmente el sistema y realice la toma de mediciones de sensores y, en el caso de los sensores de humedad de suelos, si el sustrato no cumple con las condiciones requeridas para la vegetación, accione el sistema de recirculación de la sección correspondiente.

Otro de los factores a considerar de las baterías es que se puede utilizar diferentes tipos, como son las baterías recargables LiPo (*Lithium Polymer*) (figura 20) o Li-Ion (*Lithium-Ion*) las cuales dependiendo de su capacidad tienen diferentes presentaciones. por lo que se puede optar por una que tenga mayor capacidad para aumentar el tiempo entre recargas, esto mientras se respete el rango de voltaje máximo para la tarjeta que es de 5.5 V, otra opción es alimentarla como se mencionó anteriormente con un conjunto de baterías doble A alcalinas siendo el recomendado un paquete de tres, aunque también se puede optar por un conjunto de cuatro pilas verificando que su condición de voltaje no supere el permitido.

Si se trata de baterías recargables en formato doble o triple A como las mostradas en la figura 21 se recomienda que como mínimo se usen conjuntos de cuatro pilas porque estas tienen un voltaje menor a las alcalinas, siendo un valor de 1.2 V por cada batería en comparación a los 1.5 V de las pilas alcalinas.



Figura 20 Batería LiPo de 3.7 V a 2500 mAh Recuperado de: <http://tinyurl.com/3ck54sdd>



Figura 21 Pilas recargables AA de Amazonbasics Recuperado de: <http://tinyurl.com/59m2znnz>

Adicionalmente al tiempo de activación predeterminado la tarjeta cuenta con un botón accionador denominado *Poke* (cuyo señalamiento es el de una mano señalando) que despierta al sistema si se quisiera tomar medidas en un momento preciso o si se requiere comprobar el correcto funcionamiento del sistema. En la figura 22 se tiene el diagrama de flujo donde se muestra funcionamiento del sistema de monitoreo:

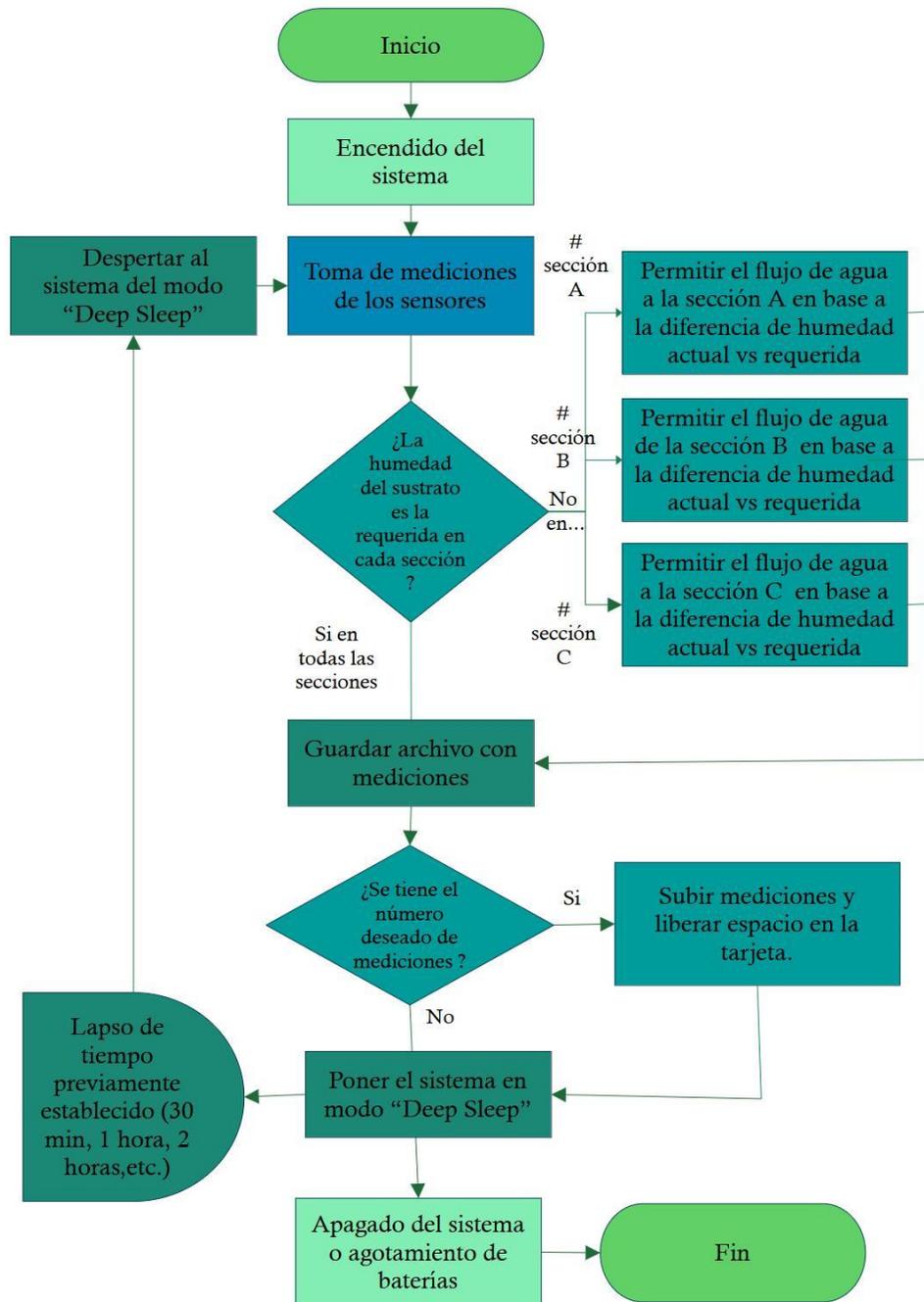


Figura 22 Diagrama de flujo de la tarjeta Enviro Grow

Finalmente, los últimos tres componentes a resaltar dentro de la tarjeta Enviro Grow son las salidas de información que son: 1 LED blanco, 1 LED rojo y un buzzer. Estas salidas funcionan para indicar en qué condiciones se encuentra el sistema, si el LED blanco se encuentra parpadeando indica que se encuentra en operación, si el LED rojo se encuentra parpadeando indica que se tiene un error en la operación; el cual puede ser un error al conectar a una red Wi-Fi, que el almacenamiento está casi lleno y no se pueden tomar medidas, que el reloj de la tarjeta no se encuentra sincronizado con el tiempo actual, etc. Por último el buzzer se puede configurar para emitir un pitido para las condiciones que se deseen como puede ser en el encendido del sistema o si se presenta un error.

Software del sistema

La tarjeta Enviro Grow ya viene cargada con un software preconfigurado, el cual se puede encontrar en la red en el repositorio Pi Moroni/Enviro del sitio web GitHub y se debe de verificar que sea la versión más reciente. Este software es compatible con toda la gama de tarjetas Enviro, ya que está programado para identificar en que tarjeta está colocado y habilitar la programación de sus sensores.

El software está escrito en el lenguaje de programación Micropython el cual es una derivación del lenguaje de programación Python. Mientras que Python fue desarrollado para sistemas computacionales como computadoras o servidores, Micropython fue desarrollado especialmente para el desarrollo de microcontroladores (Halfacree & Everard, 2021) .

Para poder acceder a la programación de software en la tarjeta se requiere de un conector micro USB y una computadora la cual posea un entorno de desarrollo integrado (IDE por sus siglas en inglés) que sea compatible con la RPi Pico. El IDE recomendado por Raspberry Pi es Thonny, un IDE diseñado para iniciantes en temas de programación y que es un programa de código abierto el cuál se encuentra disponible para los sistemas operativos Windows, MacOS y Linux.

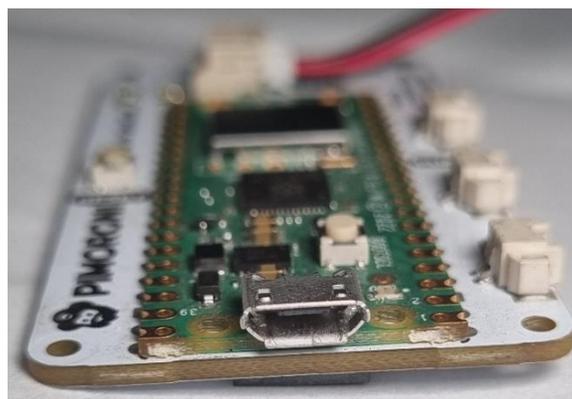


Figura 23 Fotografía de Enviro Grow

En cuanto a los temas de actualización de software se tiene que bajar un archivo uf2, que es una imagen precargada del sistema operativo, del repositorio de Enviro en Github, una vez que se tenga el archivo se tiene que conectar la tarjeta con el cable

microusb a la computadora asegurandose de mantener presionado el boton *BOOTSEL* hasta que la computadora identifique la tarjeta y se puede abrir en el explorador de archivos con el nombre de “RPI-P2” como si se tratara de una memoria usb.

Finalmente se debe de copiar el archivo *uf2* a RPI-P2 y una vez que se logre se debe de reiniciar la tarjeta para que se efectuen los cambios, ya sea presionando el boton *reset* o desconectando y volviendo a conectar la tarjeta a la computadora.

Cuando se conecta por primera vez la tarjeta con el cable micro USB o se le conecta una batería, la tarjeta entrará en el modo de configuración inicial (modo *Provisioning*), el cual habilitará una red Wi-Fi cuyo nombre es el de “Enviro Grow Setup” al cual se tiene que conectar mediante un aparato electrónico como un celular, una tableta o una computadora.

Una vez que se establece la conexión a la red Wi-Fi se debe utilizar un explorador web e introducir la dirección 192.168.4.1:80.

En la dirección antes mencionada aparecerá un sitio donde se indica que modelo de Enviro es el de la tarjeta y se podrá acceder a la configuración precargada haciendo clic en los botones azules que se muestran en cada sección (figura 25).

Lo primero a configurar es la del nombramiento de la tarjeta, ya que se pueden integrar varias tarjetas es importante tener una buena organización con nombres claros y sencillos. Solo se aceptan nombres cuyos caracteres sean con minúsculas, números y guiones bajos.



Figura 24 Captura de Pantalla de selección de redes Wi-Fi Android

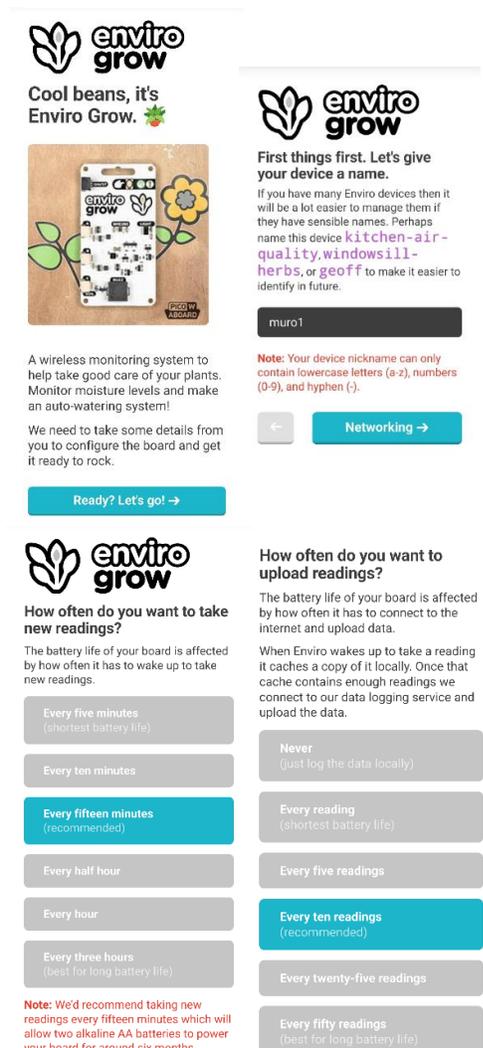


Figura 25 Capturas de pantalla del sitio web de configuración inicial de enviro grow



Where are you uploading your data to?

Let's get real, data is nothing without analysis. Let's get the good stuff off this board and somewhere that we can make use of it.

Nowhere

For now I just want to log this data locally and grab it over USB now and again.

A custom HTTP endpoint

We'll make a request to your supplied URL with all of the data included.

InfluxDB

The Time Series Data Platform where developers build IoT, analytics, and cloud applications.

An MQTT broker

The most commonly used messaging protocol for the Internet of Things (IoT).

Adafruit IO

A platform designed by our friends at Adafruit to store and display your data.



Let's set up your moisture sensors.

Every plant likes a different amount of moisture in its soil! We've provided some default percentage values below to start you off, but later on you might want to come back and adjust these levels.

When the soil moisture level gets below the target, Grow will chirp at you with three unique tones to let you know which plant needs watering.

Note: If you want to turn these audio alerts off (or if you're not using all three channels), set the appropriate channels to 0.

Channel A moisture target.

80

Channel B moisture target.

75

Channel C moisture target.

50

Figura 26 Capturas de pantalla del sitio web de configuración inicial de enviro grow

La segunda configuración es la de seleccionar la red Wi-Fi a la cual se encontrará conectado el sistema, se desplegará una lista de redes a las cuales se puede conectar, pero, en esta no se mostrará la intensidad de la conexión por lo que es de vital importancia conectarla a una red cuya conexión sea estable y se tenga la mayor intensidad de señal posible.

La tercera configuración que se realiza es cada cuanto se realiza la toma de medidas de los sensores, las opciones precargadas son 5,10,15,30,60 ó 180 minutos; seguido de esto nos pide el número de mediciones que debe de tener antes de ser subidas en caso de conectarse a un sistema en línea y sus opciones precargadas son: Nunca para casos de sistemas sin conexión a internet y cada 1,5,10,25 y 50 lecturas.

La cuarta configuración es a donde se subirá la información recabada por los sensores, esto se muestra en la figura 26, de las cuales se tienen cuatro opciones:

- A ningún lado (se requerirá hacer un vaciado de datos constantemente para liberar espacio en la RPi Pico y dependiendo de la frecuencia podría hacer diario, semanal o mensualmente).
- A una dirección http predeterminada (si se tiene un sitio web o un servidor privado esta sería la mejor opción).
- • Al sitio web Adafruit IO (para esta opción se requiere crear una cuenta y suscribirse a este servicio, se tienen dos tipos de suscripciones: gratuita que permite introducir 30 datos de información por minuto, almacenamiento de la información por 30 días y solamente se pueden subir 10 variables de información; mientras que para la suscripción Power Up se tiene 60 datos por minuto, almacenamiento por 60 días y ningún límite para variables subidas).

- Al sitio web InfluxDB (similar a Adafruit IO se requiere crear a una cuenta para suscribirse pero su principal diferencia radica que no se tienen límites en cuanto a la cantidad de información subida y de igual manera en el plan gratuito se guarda la información por 30 días).
- A un bróker MQTT (Si se tiene un programa que sirva como MQTT aquí se puede recibir la información directamente).

Finalmente como último paso se tienen los parámetros de humedad deseados para los sensores A, B y C los cuales van de 0 al 100%, así como la activación del riego automatizado.

Si se llega a requerir hacer una reconfiguración al sistema se puede acceder al modo configuración inicial mediante dejar presionado el botón *Poke*, luego presionar y soltar el botón *Reset*, se debe de dejar el botón *Poke* presionado por otros tres segundos después de los cuales el LED blanco parpadeara rápidamente indicando que se entró al sistema de configuración inicial.

Ya colocando el sistema de monitoreo se tiene que considerar que la tarjeta Enviro Grow puede alimentar como máximo 3 sistemas de bombeo por lo que para cada módulo del sistema constará de 3 niveles: superior, intermedio e inferior. En el nivel intermedio es donde se instalará la tarjeta para reducir la distancia del cableado de las bombas y de los sensores de humedad.

4.2. Diseño del sistema hidráulico

Empezando por el diseño del sistema hidráulico para cada módulo del prototipo se tendrán tres jardineras, donde cada una tendrá su propio sistema de recirculación por medio de las bombas conectadas a la tarjeta Enviro Grow, este diseño inicial se muestra en la figura 27. Al nivel superior se le denomina “A”, al nivel intermedio “B” y al nivel inferior “C”, esto para tener concordancia con la nomenclatura de la tarjeta Enviro Grow. Debajo de cada jardinera se colocará un contenedor que servirá de almacenamiento de agua y estará conectado mediante perforaciones en la maceta de

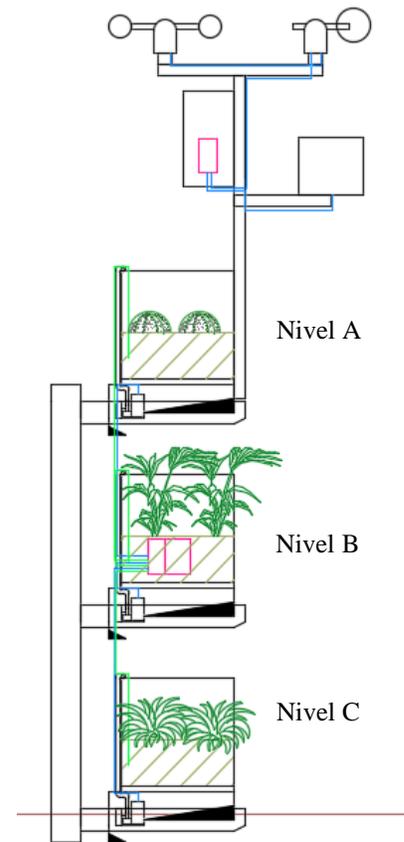


Figura 27 Diseño inicial del sistema de muro verde

la jardinera para permitir el flujo de agua de la maceta al contenedor, y mediante al sistema de bombeo de baja potencia se llevará el agua del contenedor a la maceta.

Para evitar afectaciones por sólidos al sistema de bombeo se tendrá una capa filtrante que retenga los sólidos del sustrato pero que permita el libre paso del fluido.

En cada contenedor de agua se tiene una conducción de desfogue que se conectara con la jardinera del nivel inferior, esto con la finalidad de poder suministrarle agua a todo el sistema mediante el nivel del superior del muro y que se encuentren conectados todos los reservorios de agua.

Para el desfogue se puede utilizar tanto tubería flexible como rígida esto dependiendo del espacio y las condiciones de donde se vaya a colocar el sistema de muros, en comparación para el sistema de bombeo solo se puede utilizar manguera flexible que sea de las dimensiones de $\frac{1}{4}$ de pulgada.

4.3. Diseño del sistema de muro

Finalmente para diseño del sistema de muro se tiene un anclaje a pared por medio de elementos metálicos que pueda sostener el peso total de las jardineras. Para garantizar que no se presenten afectaciones por humedad en la pared para su anclaje se tiene una separación entre el muro y las jardineras de 7 centímetros.

Las dimensiones de la jardinera son 60 cm de ancho, 20 cm de profundidad y 20 cm de altura, para el contenedor de agua son de 60 cm de ancho, 20 cm de profundidad y 10 cm de altura. En cuanto a las dimensiones del módulo el ancho por módulo es de 60 cm y se tiene una altura del módulo cercana a la de un metro ya que se tiene en consideración que puede ser de mayor tamaño por el ancho de las placas metálicas.

En cuanto al diseño de cada jardinera se tendrá solamente un relleno de 10 cm debido a dos razones: los sensores de humedad del suelo, debido a que estos solo tienen un rango efectivo de medición de 8 cm, y tener 10 cm de espacio libre para el crecimiento de las plantas dentro de la jardinera.

5. Construcción del sistema

5.1 Elaboración de jardineras

Para la construcción del sistema se eligieron macetas de fibra de vidrio que servirán como jardineras y como reservorios de agua. Las macetas utilizadas poseen las siguientes formas:

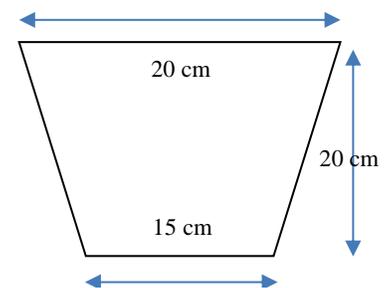


Figura 28 Maceta Trapezoidal que se usó de reservorio de agua

- Prisma trapezoidal con una base mayor de 20 cm en la parte superior, base menor de 15 cm, altura de 20 cm, un largo de 60 cm en su parte superior y en su parte inferior de 50 cm (figura 28).

Estas son las macetas que se utilizaron como jardineras.

A estas macetas se les recortó 2 cm de altura para que al ser colocadas en el sistema resalten más las plantas.

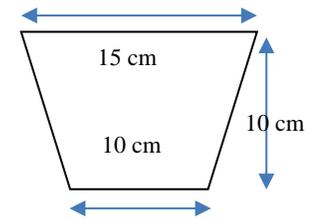


Figura 29 Maceta Trapezoidal que se usó de reservorio de agua

- Prisma trapezoidal con una base mayor de 15 cm en la parte superior, base menor de 10 cm, altura de 10 cm y un largo de 40 cm (figura 29). Estas son las macetas que se usaron como reservorios del nivel A y el nivel B.

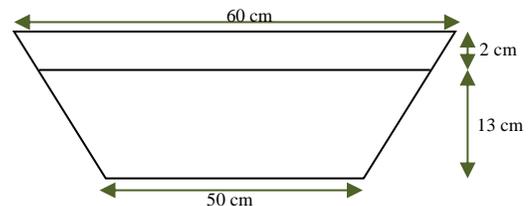


Figura 30 Maceta Trapezoidal que se usó de jardinera para todos los niveles del sistema

- Rectangular con 15 cm altura, 15 cm de ancho y un largo de 60 cm (figura 31) . Esta maceta fue la que se usó como reservorio del nivel C.

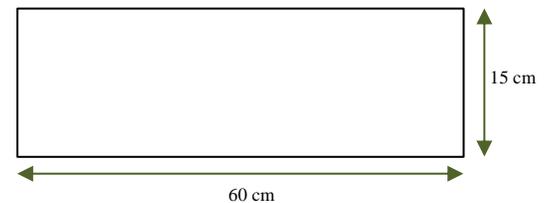


Figura 31 Maceta rectangular que se usó como reservorio para el nivel C

A las macetas de jardineras se les hicieron perforaciones de 0.5 cm de diámetro cada 2 cm en un arreglo de rejilla para garantizar el flujo de agua.

Mientras que para las macetas de reservorio se les hicieron tres perforaciones dos en las orillas con un diámetro de una 3.5 mm para la interconexión entre reservorios mediante tubería de pvc de 1 pulgada como se muestra en la figura 33, y en medio una perforación de 8 mm para la salida de la manguera de ¼ de pulgada para el sistema de bombeo de cada jardinera como se muestra en la figura 32.

Cabe mencionar que al realizar estas modificaciones se tomarón las medidas de seguridad necesarias debido a que la fibra de vidrio al ser cortada o perforada se vuelve un polvo nocivo para la salud, si se adhiere a la piel genera una sensación de picazón y su remoción es difícil.



Figura 32 Reservorio de agua con codo de 1" de PVC



Figura 33 Reservorio de agua con perforación para tubería de 1/4" de PVC

El material elegido para las tuberías de recirculación fue el de PVC siendo su diámetro nominal el de 1 pulgada y para el sistema de recirculación de agua se tuvieron dos tipos diferentes de mangueras, ambas de PVC, la primera siendo la manguera que se conecta a las bombas teniendo un diámetro interior de 6mm y posteriormente estas se conectaron al otro tipo con un diámetro interior de 4 mm. La razón de la reducción del diámetro fue que con ese diámetro interior se pudo conectar elementos de riego como aspersores y tees.

Una vez realizadas las preparaciones de las macetas se empezó con la preparación del sustrato y la elección de plantas. Para las plantas se optó por plantas que puedan ser expuestas a la intemperie, que les pueda dar el sol por un tiempo elevado y que sus raíces no sean extensas para no superar los 10 centímetros que se tienen contemplado de sustrato.

Para los niveles B y C del sistema de muros se eligió la planta comunmente conocida como árbol de jade (*Crassula ovata*) para su colocación en la parte trasera de la maceta, mientras que en la parte delantera en el nivel C se utilizó la planta comunmente conocida como cola de borrego o cola de burro (*Sedum morganianum*), y en el nivel B se colocó la planta comunente conocida como Perla Von (*Echevería Perle Von Nürnberg*). Mientras tanto para el nivel A se plantó la flor comunmente conocida como margarita (*Bellis perennis*).

Debido a que las plantas utilizadas en las jardineras B y C del prototipo son pertenecientes a las suculentas se consiguió un sustrato que fue recomendado para su crecimiento por los mismos vendedores de las plantas, entre las características que mencionaron fue que estaba compuesto por fibra de coco.

Antes de la colocación del sustrato se realizó la instalación de una malla anti-malezas resistente a las perforaciones que permite el libre flujo de agua y de aire, esto con el motivo de evitar que las raíces lleguen a tapar los orificios por los cuales escurrirá el agua. Se utilizaron dos capas de la malla en cada maceta.

Una vez terminado de colocar el sustrato se procedió a plantar las suculentas, para la jardinera C se colocaron 5 especímenes de árbol de jade y 3 de cola de burro, para la jardinera B se colocaron 3 especímenes de árbol de jade y 8 especímenes de perla von, para la jardinera A se colocaron tres grupos de margaritas, en las orillas se colocaron margaritas con flores rosas y en el centro margaritas con flores blancas. En las figuras 34 y 35 se muestran las jardineras ya con la vegetación plantada.



Figura 34 Jardinera C con árbol de jade y cola de burro izquierda. jardinera B con árbol de jade y perla von derecha



Figura 35 Jardienra A con margaritas

Finalmente como última adecuación a los reservorios de agua se utilizó un anclaje de las bombas mediante el uso de zinchos y una resina epóxica para evitar su movimiento y garantizar su correcto funcionamiento.

5.2 Preparación del software Enviro Grow

Al terminar los trabajos de preparación de las jardineras se empezó con el desarrollo de la programación e instalación del sistema de monitoreo, como primera acción se realizó la actualización del software que viene precargado en las tarjetas Enviro. Para poder realizar la actualización se descargó el archivo uf2 más reciente del repositorio Enviro en Github, la versión a la que se actualizo fue a la 0.0.10 de enviro con la versión de micropython 1.20.4.



| Nombre | Tipo | Tamaño |
|--------------|-----------------------|--------|
| INDEX.HTM | Firefox HTML Docum... | 1 KB |
| INFO_UF2.TXT | Documento de texto | 1 KB |

Figura 36 Captura de pantalla de explorador archivos con acceso a RPI-RP2 antes de actualizar

Una vez que se tuvo la tarjeta actualizada a la versión más reciente se realizó la configuración inicial, pero, una vez realizada se hizo la modificación de manera detallada en el archivo `config.py` mediante el programa Thonny.

Los archivos que se modificaron dentro de la tarjeta Enviro Grow fueron los siguientes:

1. “`main.py`”: Las modificaciones que se realizaron en este archivo se hablan en detalle en una sección posterior, ya que estas modificaciones son pertenecientes a la implementación de un nuevo sensor al sistema.
2. “`config.py`”: Este archivo es aquel que recopila la información de configuración durante el modo *provisioning* por lo que sus modificaciones son los parámetros a configurar como son los valores deseados de humedad de suelos, el nombre del sistema, cada cuánto es la toma de medidas, etc.

Las variables modificadas se agruparon en la tabla 4.

| Parámetro (función del parámetro) | Valor (Significado) |
|---|---|
| <i>nickname</i> (nombre del sistema) | “muro1” |
| <i>reading_frecuency</i> (frecuencia de la toma de medidas de los sensores) | “10” (Cada 10 minutos se prende el sistema) |
| <i>destination</i> (el destino final de las mediciones) | “adafruit_io” (El sitio web Adafruit IO) |
| <i>upload_frecuency</i> (cada cuantas mediciones se suben) | “2” (cada tres mediciones) |
| <i>auto_water</i> (si la humedad de suelo no cumple con el deseado se van a activar los sistemas de bombeo) | “True” (Activado) |
| <i>moisture_target_a</i> (La humedad de suelo deseada para la jardinera a en %) | “75” |
| <i>moisture_target_b</i> (La humedad de suelo deseada para la jardinera b en %) | “45” |
| <i>moisture_target_c</i> (La humedad de suelo deseada para la jardinera c en %) | “50” |

Tabla 4 Parámetros modificados del archivo *config.py*

3. “*grow.py*”: Para este archivo solo se modificó el tiempo en el cual se activan los sistemas de bombeo, ya que en la versión original el tiempo es calculado a partir de la diferencia del valor de humedad deseado con el valor medido entre 15. La modificación que se le hizo fue cambiar la división a 1.5 y establecer un valor mínimo de 5 segundos y un valor máximo de 10 segundos (figura 37).

```

83 for i in range(0, 3):
84     if moisture_levels[i] < targets[i]:
85         # determine a duration to run the pump for
86         duration = round((targets[i] - moisture_levels[i]) / 1.5, 1)
87         if duration > 10 :
88             duration=10
89         if duration < 3 :
90             duration=4
91         #duration=4
92         logging.info(f"> sensor {CHANNEL_NAMES[i]} below moisture target {targets[i]} (currently at {int(moisture_levels[i])}).")
93
94     if config.auto_water:
95         logging.info(f" - running pump {CHANNEL_NAMES[i]} for {duration} second(s)")
96         pump_pins[i].value(1)
97         time.sleep(duration)
98         pump_pins[i].value(0)
99     else:
100        logging.info(f" - playing beep")
101        for j in range(0, i + 1):
102            drip_noise()
103            time.sleep(0.5)

```

Figura 37 Código del archivo *grow.py* en donde se modifica los tiempos de riego

El sensor que se añadió al sistema es el sensor LTR390 el cual es un sensor de luz ambiental y de luz ultravioleta, este se pudo implementar fácilmente con la tarjeta Enviro Grow debido a que ambos tienen puertos STEMMA QT, este sensor se muestra en la figura 38.

La tarjeta en la cual se encuentra el sensor fue desarrollada para el lenguaje de programación circuitpython el cual no es compatible con micropython pero se logró encontrar un repositorio en el que se tenían las librerías necesarias para su funcionamiento, el autor original de las librerías es Tony Goodhew y el autor que las adaptó para su funcionamiento para una tarjeta Enviro Grow fue el usuario Chaifox en los foros del sitio web de Pimoroni (Goodhew & Chaifox, 2023).

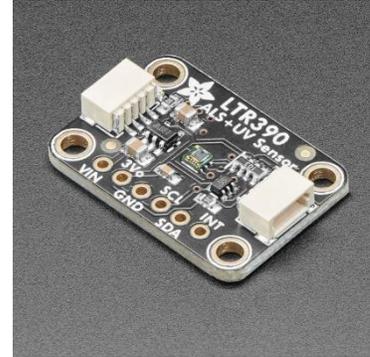


Figura 38 Tarjeta del sensor LTR390
Obtenido de: <http://tinyurl.com/33jrmaf>

Para poder acoplarlo en el sistema se creó un archivo de librería en la carpeta enviro con el nombre de “ltr390.py” (figura 40) y se agregaron líneas de código en el archivo main.py a partir de la línea 73 (figura 39).

```

67     enviro.logging.debug(f"> {filesystem_stats[3]} blocks free out of {filesystem_stats[2]}")
68
69     # TODO should the board auto take a reading when the timer has been set, or wait for the time?
70     # take a reading from the onboard sensors
71     enviro.logging.debug(f"> taking new reading")
72     reading = enviro.get_sensor_readings()
73     try:
74         enviro.logging.info(f"> trying to start ltr readings")
75         #LTR390 readings
76         ltr = LTR390()
77
78         ltr.setUVS()
79         sleep(0.6) # may be able to decrease delay but have not tried
80         uvsData = ltr.UVS()
81         reading["uvs"] = uvsData
82         #1 UVI per 2300 counts at 18X gain factor and 20-bit resolution. uvi = (uvs / 2300)
83         reading["uvi"] = uvsData/2300
84         enviro.logging.info(f"> uvi/als readings - uvs: {uvsData}")
85
86         ltr.setALS()
87         sleep(0.5)
88         alsData = ltr.ALS()
89         reading["als"] = alsData
90         #logging.info(f"> uvi/als readings - als: {alsData}")
91
92         ltr.reset()
93
94     except Exception as exc:
95         enviro.exception(exc)
96
97     # here you can customise the sensor readings by adding extra information
98     # or removing readings that you don't want, for example:
99     #
100    #   del readings["temperature"]      # remove the temperature reading
101    #
102    #   readings["custom"] = my_reading() # add my custom reading value
103
104    # is an upload destination set?
105    if enviro.config.destination:
106        # if so cache this reading for upload later
107        enviro.logging.debug(f"> caching reading for upload")
108        enviro.cache_upload(reading)

```

Figura 39 Código del archivo main.py en donde se agrega la toma de medidas del sensor LTR390

```

1 # WaveShare Sensor UV 1 Sept 2021 Working
2 # https://optoelectronics.liteon.com/upload/download/DS86-2015-0004/LTR-390UV_Final_%20DS_V1%201.pdf
3 import math
4 import enviro #only needed if this code is in its own file
5 from machine import Pin, I2C
6 ADDR = (0x53)
7
8 LTR390_MAIN_CTRL = (0x00) # Main control register
9 LTR390_MEAS_RATE = (0x04) # Resolution and data rate
10 LTR390_GAIN = (0x05) # ALS and UVS gain range
11 LTR390_PART_ID = (0x06) # Part id/revision register
12 LTR390_MAIN_STATUS = (0x07) # Main status register
13 LTR390_ALSDATA = (0x00) # ALS data lowest byte, 3 byte
14 LTR390_UVSDATA = (0x10) # UVS data lowest byte, 3 byte
15 LTR390_INT_CFG = (0x19) # Interrupt configuration
16 LTR390_INT_PST = (0x1A) # Interrupt persistence config
17 LTR390_THRESH_UP = (0x21) # Upper threshold, low byte, 3 byte
18 LTR390_THRESH_LOW = (0x24) # Lower threshold, low byte, 3 byte
19 #ALS/UVS measurement resolution, Gain setting, measurement rate
20 RESOLUTION_20BIT_utime400MS = (0x00)
21 RESOLUTION_19BIT_utime200MS = (0x10)
22 RESOLUTION_18BIT_utime100MS = (0x20)#default
23 RESOLUTION_17BIT_utime50MS = (0x3)
24 RESOLUTION_16BIT_utime25MS = (0x40)
25 RESOLUTION_13BIT_utime12_5MS = (0x50)
26 RATE_25MS = (0x0)
27 RATE_50MS = (0x1)
28 RATE_100MS = (0x2)# default
29 RATE_200MS = (0x3)
30 RATE_500MS = (0x4)
31 RATE_1000MS = (0x5)
32 RATE_2000MS = (0x6)
33 # measurement Gain Range.
34 GAIN_1 = (0x0)
35 GAIN_3 = (0x1)# default
36 GAIN_6 = (0x2)
37 GAIN_9 = (0x3)
38 GAIN_18 = (0x4)
39 |
40 class LTR390:
41     def __init__(self, address=ADDR):
42         self.i2c = enviro.i2c
43         self.address = address
44         self.ID = self.Read_Byte(LTR390_PART_ID)
45
46         if(self.ID != 0xB2):
47             print("read ID error!,Check the hardware...")
48             return
49
50         self.Write_Byte(LTR390_MAIN_CTRL, 0x0A) # Set mode to UVS and Enabled
51         self.Write_Byte(LTR390_MEAS_RATE, RESOLUTION_20BIT_utime400MS | RATE_2000MS) # Resolution=18bits, Meas Rate = 100ms
52         self.Write_Byte(LTR390_GAIN, GAIN_3) # Gain Range=3.
53
54     def Read_Byte(self, cmd):
55         rdate = self.i2c.readfrom_mem(int(self.address), int(cmd), 1)
56         return rdate[0]
57
58     def Write_Byte(self, cmd, val):
59         self.i2c.writeto_mem(int(self.address), int(cmd), bytes([int(val)]))
60
61     def setUVS(self):
62         self.Write_Byte(LTR390_GAIN, GAIN_18) # Gain Range=18, default 3. has to be 18 for uvi calc
63         self.Write_Byte(LTR390_MAIN_CTRL, 0x0A) # UVS in Active Mode
64
65     def UVS(self):
66         #self.Write_Byte(LTR390_GAIN, GAIN_18) # Gain Range=18, default 3. has to be 18 for uvi calc
67         #self.Write_Byte(LTR390_MAIN_CTRL, 0x0A) # UVS in Active Mode
68         Data1 = self.Read_Byte(LTR390_UVSDATA)
69         Data2 = self.Read_Byte(LTR390_UVSDATA + 1)
70         Data3 = self.Read_Byte(LTR390_UVSDATA + 2)
71         uv = (Data3 << 16) | (Data2 << 8) | Data1
72
73         return uv
74
75     def setALS(self):
76         self.Write_Byte(LTR390_GAIN, GAIN_3)
77         self.Write_Byte(LTR390_MAIN_CTRL, 0x02) # ALS in Active Mode
78
79     def ALS(self):
80         #self.Write_Byte(LTR390_GAIN, GAIN_3)
81         #self.Write_Byte(LTR390_MAIN_CTRL, 0x02) # ALS in Active Mode
82         Data1 = self.Read_Byte(LTR390_ALSDATA)
83         Data2 = self.Read_Byte(LTR390_ALSDATA + 1)
84         Data3 = self.Read_Byte(LTR390_ALSDATA + 2)
85         als = (Data3 << 16) | (Data2 << 8) | Data1
86
87         return als
88
89     def reset(self):
90         self.Write_Byte(LTR390_MAIN_CTRL, 0x00) # turn off als/uv before enviro cuts power while sleeping

```

Figura 40 Código del archivo ltr390.py

Este sensor obtiene dos mediciones directas y dos mediciones derivadas, las directas son el valor de luz ambiental y un conteo de radiación ultravioleta; las dos derivadas son el valor lumínico y el índice ultravioleta (UVI).

Las unidades derivadas se obtienen con las siguientes ecuaciones:

$$Lux_{calc} = \frac{0.6 * ALS}{GAIN * INT} * W_{FAC} [lux]$$

Donde:

ALS es el valor registrado de luz ambiental por el sensor

GAIN es un factor de ganancia basado en la programación, sus valores pueden ser 1,3,6,9 o 18 y el valor default es 3, pero en el código que se tiene su valor es de 18.

INT es el valor del tiempo de integración el cual está definido por la resolución de la medición y sus posibles valores se muestran en la tabla 5, el valor que se tiene de resolución en la programación es de 18-bit por lo que su valor es de 1.

W_{FAC} es un valor de corrección por ventana el cual vale 1 cuando se encuentra al aire libre o a través de una ventana sin ninguna coloración; si se tiene una ventana con coloración se tiene que hacer una calibración con un led blanco y el valor debe de ser mayor a 1 (Lite-on Optoelectronics, 2016).

| Resolución (bit) / Tiempo de integración (ms) | Valor de de INT |
|---|--------------------------|
| 16-bit, 25ms | 0.25 |
| 17-bit, 50ms | 0.5 |
| 18-bit, 100ms | 1 |
| 19-bit, 200ms | 2 |
| 20-bit, 400ms | 4 |

Tabla 5 Valores de INT para el sensor LTR390

Por lo que la ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$Lux_{calc} = \frac{0.6 * ALS}{18 * 1} * 1 = \frac{ALS}{30} [lux]$$

Mientras tanto para el cálculo del índice UV se tiene la siguiente ecuación:

$$UVI = \frac{UV_{Sensor\ Count}}{UV_{Sensitivity}} * W_{FAC}$$

Donde:

$UV_{\text{SensorCount}}$ es el conteo registrado por el sensor en el espectro de luz ultravioleta A

$UV_{\text{Sensitivity}}$ es el valor que se tiene para separar los diferentes niveles de índice ultravioleta, el valor recomendado por el fabricante del sensor es de 2300 y se tiene que calibrar con el valor local de UVI, para el caso de la CDMX se encontró que un valor de 1400 da resultados congruentes con los datos por el sitio de aire de la CDMX.

5.2.1 Adafruit IO

Adafruit IO fue la plataforma que se seleccionó como destino de las mediciones de los sensores, la razón principal fue a la facilidad con la cual se pueden vincular las tarjetas y que se pueden compartir fácilmente los datos dentro de esta plataforma, ya que con solo tener la liga y estar habilitado la opción de datos públicos se pueden acceder las mediciones sin requerir una cuenta.

En caso de que se llegue a requerir la descarga de los datos si se necesario tener una cuenta pero el proceso por el cual se comparten es sencillo.

Hablando propiamente del desarrollo en la plataforma se inició con la creación de una cuenta como se muestra en la figura 41, para la cual se nos pidió de información el nombre del que será el dueño de la cuenta, un correo electrónico para el ingreso y un nombre de usuario. El nombre de usuario es fundamental para la vinculación de la cuenta a los dispositivos, ya que es una de las dos partes necesarias para su realización, se recomienda usar un nombre de usuario corto para facilitar su entrada en el archivo de configuración *config.py*.

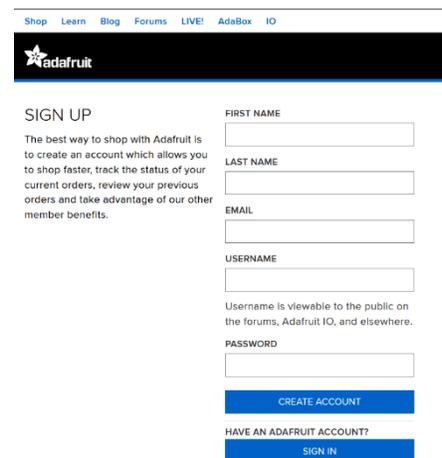


Figura 41 Creación de cuenta del sitio: https://accounts.adafruit.com/users/sign_up

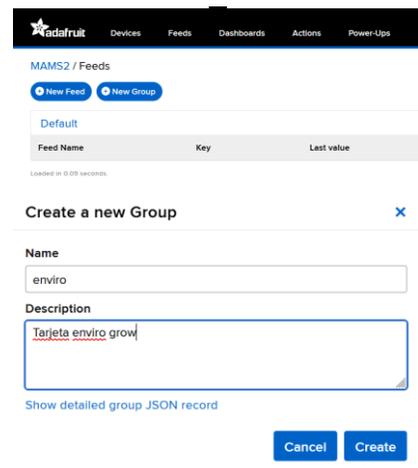


Figura 42 Creación de grupo en Adafruit IO



Figura 43 Barra de opciones del sitio Adafruit IO

Una vez creada la cuenta lo siguiente que se hizo fue la creación de un grupo con el nombre de “enviro”, y se borró el grupo *default* como se muestra en la figura 42, lo siguiente fue obtener la clave de IO (figura 44), la cual es la segunda parte necesaria para la vinculación de dispositivos, a través de hacer clic al icono de llave ubicado en la parte superior derecha del sitio.

Posteriormente se realizó la elaboración de dos acciones en la pestaña *actions* (figura 45), estas acciones son la de enviar un correo cada día 20 del mes como recordatorio para bajar la todas las mediciones que se realizaron, ya que como se mencionó

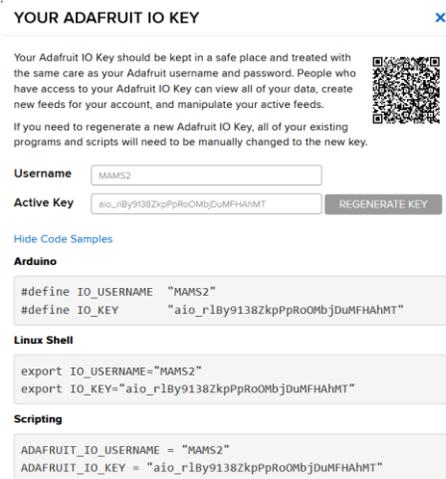


Figura 44 Ventana con la clave IO de Adafruit

anteriormente el sitio solo las guarda por un total de 30 días. La segunda acción fue la de enviar un correo cada vez que la humedad del suelo de la jardinera a llegue a un 30% donde se indique que se debe de revisar el tanque de la jardinera ya que desde este se alimentan los demás tanques y si no se cumple con la humedad requerida una de las razones puede ser que se agotó el agua.

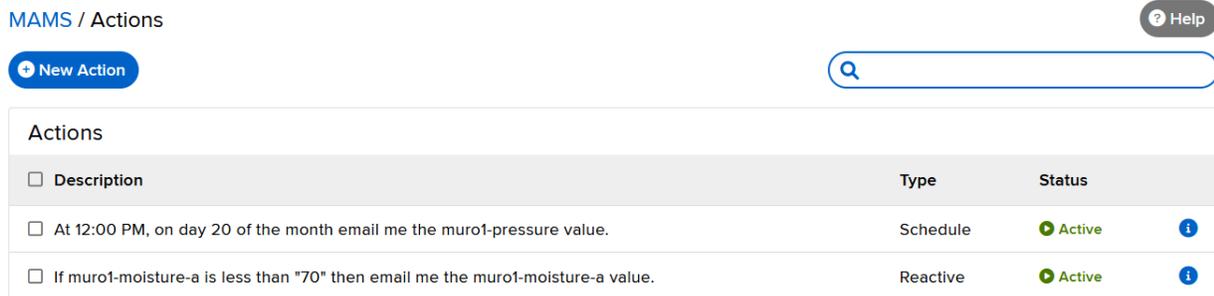


Figura 45 Pestaña "actions" del sitio web Adafruit IO

Finalmente se elaboró un *dashboard* después de iniciar correctamente la tarjeta Enviro Grow, el cual es un tablero en el cual se pueden representar de diversas maneras las mediciones, en este se colocaron las variables de presión, humedad relativa, humedad de suelos, temperatura y luminancia cada uno con una gráfica independiente (figura 46).

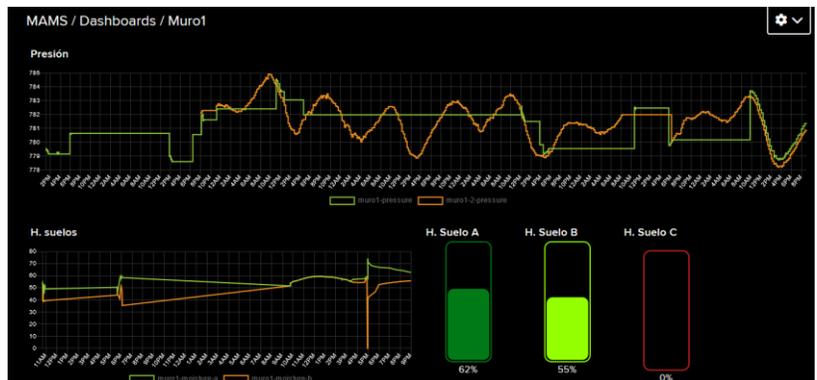


Figura 46 Dashboard con mediciones de presión y humedad de suelos

5.3 Preparación de cableado

Para la conexión de los sensores de humedad se tuvieron que fabricar los cables debido a que los que venían con el paquete de la tarjeta Enviro Grow tenían una longitud de solamente 35 cm y la longitud requerida para la conexión en el sistema es de aproximadamente de un metro.

La fabricación de estos cables se realizó mediante la utilización de cables precrimpados de 15 cm y con conectores Jst-Sh de tres pines con una separación de un milímetro, como primer paso se colocó un grupo de tres cables en el conector y en el otro extremo se les removió la punta de crimpado para poder soldarlos con los demás cables (figura 48).

A estos tres cables se les colocó un tubo termorretráctil (un tubo que al aplicar calor se encoge y garantiza una aislación eléctrica) y se alejó de la punta libre para evitar que con el calor generado durante la soldadura se reduzca su tamaño.

Ya con el tubo aplicado (figura 49) se soldaron los cables garantizando que se tuviera para cada unión un tubo termorretráctil y se soldaron cables hasta llegar a una longitud de 120 cm.

Una vez terminado los trabajos soldadura se acomodaron los tubos termorretráctiles y se les aplicó calor con una secadora de cabello hasta garantizar que se encuentren totalmente aisladas las uniones. Debido a que los cables no se encuentran pegados para agruparlos mejor se les colocó un tubo retráctil de mayor diámetro (3/16") en cada unión y se volvió a aplicar calor para terminar la fabricación del cable Jst-Sh.

En total se hicieron dos cables de 1.2 m de longitud y uno de 60 cm.

Para la conexión de las bombas hidráulicas también se tuvieron que fabricar cables pero a diferencia de los Jst-Sh, estos cables no venían precrimpados y se tenían con el conector picoblade de dos pines tanto en su formato macho como

hembra por lo que se soldaron machos con hembra.

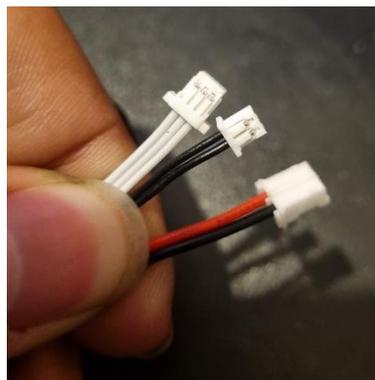


Figura 47 Fotografía de cables, Jst-Sh 3p (Izquierda), Picoblade 2p (Centro) y Jst-Ph 2p (Derecha)

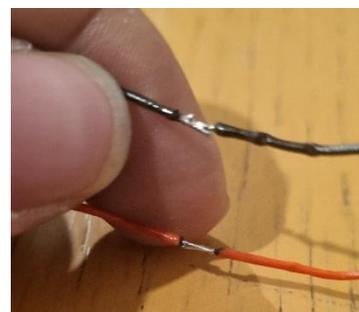


Figura 48 Fotografía de cables de bomba antes de aislar

Dado que las bombas tienen la terminación macho se pudieron conectar los cables fabricados sin requerir de soldarlos directamente por los conectores hembra de los cables.

En un inicio se utilizó una caja de baterías que contenía tres pilas doble A para alimentar al sistema pero posteriormente se logró conseguir una batería LiPo de 2500mAh con un voltaje de 3.7V y una tarjeta que permitió la conexión de un panel solar de 6 V con una potencia de 2 W para garantizar la energía sin depender de pilas (figura 50).

Esta tarjeta garantiza que el voltaje de salida sea de 4.4 V y posee 4 entradas: 2 Jst-Ph 2p (Una que se conecta a la batería LiPo y otra que es la salida de energía del sistema), USB-C (que sirve como fuente de alimentación) y un barril de corriente directa de 2.1 mm (que para poder conectarse al panel solar se requirió de un adaptador ya que su conector es de 1.1 mm).

En cuanto a la conexión de las fuentes de energía para las tarjetas se consiguieron cables de extensión Jst-Ph 2p (figura 51) para facilitar su implementación, ya que las baterías LiPo no se deben de dejar directamente al sol ni en espacios con temperaturas elevadas y por lo tanto se requiere una distancia considerable de la tarjeta debido a que esta si debe de darle la luz solar directamente para las mediciones de luminosidad.

Otra consideración importante es que estos sistemas deben de encontrarse protegidos contra la intemperie por lo que la batería LiPo se protegió mediante un gabinete de plástico de dimensiones de 7.6X2.7X5 cm el cual solo tiene una salida por la cual sale el cable Jst-Ph 2p, y en un gabinete de las mismas dimensiones se guardó la tarjeta con conexión al panel solar como se muestra en la figura 52.

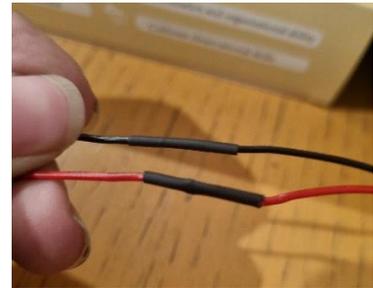


Figura 49 Fotografía de cables con tubo retráctil aislante antes de aplicar calor



Figura 50 Tarjeta de cargadora universal de baterías LiPo. Obtenido de: <http://tinyurl.com/mrx76rv3>



Figura 51 Conector Picoblade 2pin, hembra izquierda, macho derecha. Obtenido de: <http://tinyurl.com/5ervkx2>



Figura 52 Fotografías de gabinetes de plástico de batería LiPo y tarjeta cargadora de batería LiPo antes de ser cerrados.

5.4 Adicionamiento de tarjeta Enviro Weather

Como complemento del sistema de monitoreo se decidió la inclusión de la tarjeta Enviro Weather que como se mencionó en la tabla 2 posee conexiones para sensores de viento y de lluvia mediante dos puertos RJ11. El sensor de viento que se conectó consta de dos partes un anemómetro y una veleta que puede llegar a medir en 16 direcciones de manera imprecisa por lo que se configuro para toma de mediciones con 8 direcciones, mientras que el sensor de lluvia solo consta de un pluviómetro el cual se vacía cada 0.2794 mm de lluvia.



Figura 53 Pantalla Stevenson. Obtenido de: <http://tinyurl.com/mu6tz6kr>

Para la colocación de la tarjeta Enviro Weather se usó un abrigo meteorológico conocido como pantalla Stevenson (*Stevenson Screen*) (figura 53) para proteger a la tarjeta de la intemperie y permitir que se encuentre en condiciones óptimas para la toma de mediciones meteorológicas, para los sensores de viento se aseguró quedara correctamente orientado al norte. Dentro de este abrigo se colocó también una fuente de alimentación a base de baterías doble A, se optó por baterías de litio normales debido a que el consumo energético de la tarjeta es menor que el de la tarjeta Enviro Grow.

Para la configuración de la tarjeta solo se cambió el archivo *config.py* y en la tabla 5 se muestran los valores modificados:

| Parámetro (función del parámetro) | Valor (Significado) |
|---|---|
| <i>nickname</i> (nombre del sistema) | “muro1-2” |
| <i>reading_frecuency</i> (frecuencia de la toma de medidas de los sensores) | “15” (Cada 10 minutos se prende el sistema) |
| <i>destination</i> (el destino final de las mediciones) | “ <i>adafruit_io</i> ” (El sitio web Adafruit IO) |
| <i>upload_frecuency</i> (cada cuantas mediciones se suben) | “3” (cada tres mediciones) |

Tabla 6 Parámetros modificados del archivo *config.py*

5.5 Realización de pruebas

Una vez teniendo todos los componentes del sistema, salvo la estructura final, se realizaron pruebas de su funcionamiento, primero en nivel de suelo (figura 55) y posteriormente con una estructura improvisada con muebles (figura 54).

Se comprobó el funcionamiento correcto de los sensores y de las bombas, así como que se presente un flujo de agua de las jardineras a los reservorios. Se encontró que las mediciones del anemómetro no fueron las esperadas y se les atribuyó esto al espacio confinado y con obstáculos en el que se encontraba el sensor.

Para el sensor LTR390 se realizaron pruebas simultáneamente con 2 sensores (figura 56), uno bajo una capa de policarbonato transparente y otro sin ninguna capa, se encontró que el policarbonato reducía considerablemente los valores de UVS obtenidos en un valor cercano al 90%.

También se experimentó utilizando como cobertura un frasco de vidrio y en este se encontró que la reducción promedio de las mediciones de UVS fue del 25%.

Una vez hechas las pruebas se realizó el diseño de la estructura final del sistema, para esto se consideró que el sistema se hiciera con 2 módulos (aunque solo se hablara de uno en esta tesina) con la finalidad de cubrir todo el muro de donde se va a colocar.

Este diseño se puede observar en la figura 57 y en ella ya se tiene contemplado la adición de la tarjeta Enviro Weather y sus respectivos sensores. Mientras que la figura 58 se tiene el plano acotado del sistema.



Figura 54 Fotografía del sistema con una estructura improvisada con muebles



Figura 55 Realización de pruebas a nivel del suelo del sistema



Figura 56 Realización de pruebas del sensor LTR390

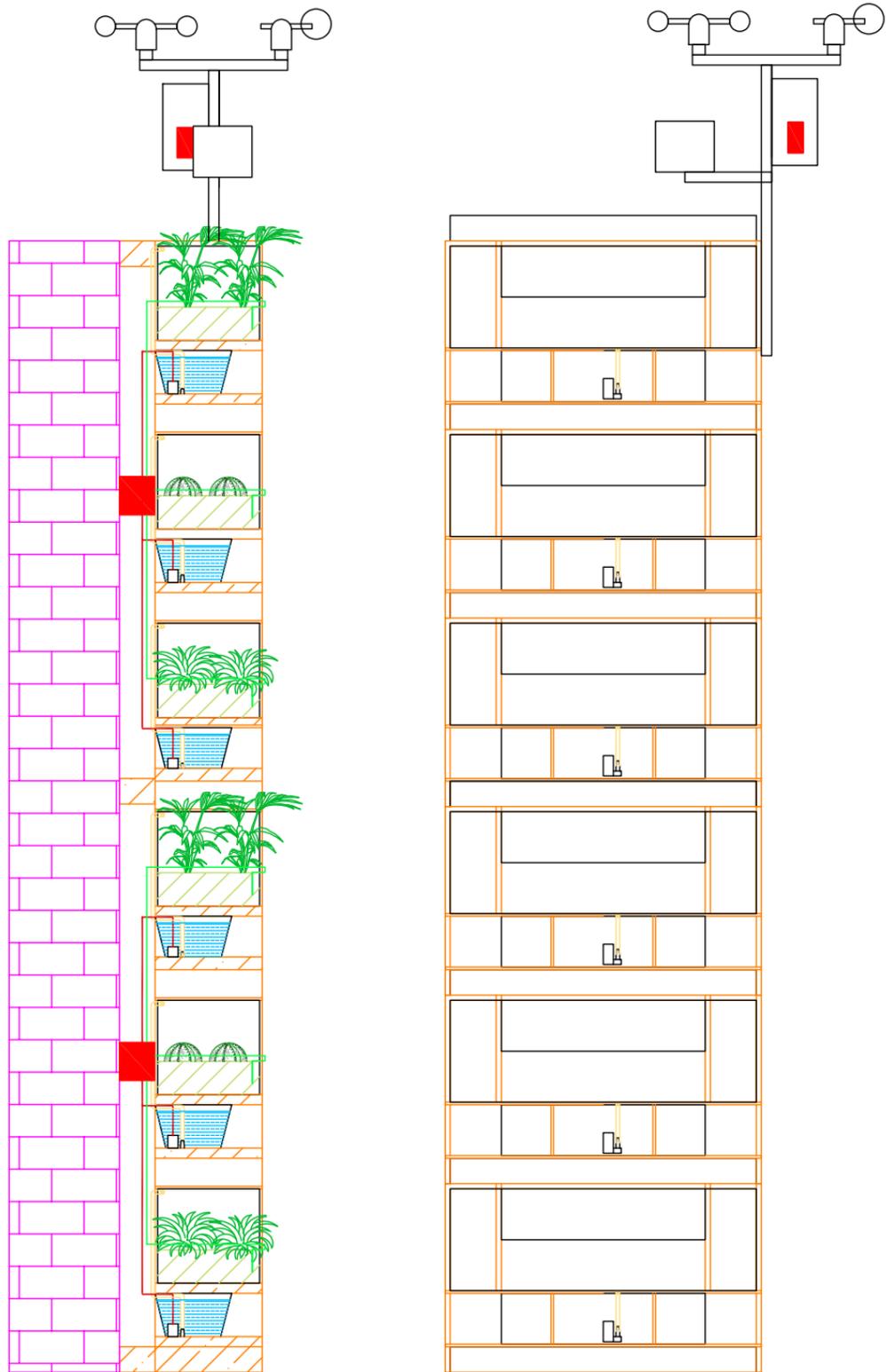


Figura 57 Diseño final del sistema de muros compuesto por 2 módulos de 3 jardineras cada uno

5.6. Colocación del sistema

Para la colocación final del sistema de muro se realizó el diseño de la estructura de soporte mostrado en la figura 58, el cual consta de seis niveles; lo que equivale a 2 módulos del sistema planteado, y se contrató a un herrero para su realización con un perfil tubular cuadrado de $\frac{3}{4}$ de pulgada. La estructura quedó instalada como se ve en la figura 59.

Una vez instalada la estructura se acopló la tarjeta enviro Weather junto a sus sensores en la parte superior para permitir que el anemómetro y la veleta se encontraran libre de obstrucciones.

Antes de la colocación de las jardineras se les colocó la red de riego a cada una, esta consta de aspersores por goteo que distribuyen el riego a lo largo de cada jardinera. A la vez de esto se colocó en cada una un sensor de humedad de tal manera que el riego no cayera directamente en el sensor.

Después se colocaron en el nivel superior la jardinera A, inferior a esta la B e inferior a esta la C; cada una con su respectivo reservorio.

Una vez realizado esto se interconectaron los reservorios con una tubería de diámetro nominal de 1" de PVC con una longitud de 33 cm cada tramo de tubería.

Se procedió al llenado de los reservorios de manera manual y se comprobó que no se presentaran fugas, lo siguiente a realizar fue la instalación propia de la tarjeta Enviro Grow y su conexión a los sensores de humedad de suelo y de las bombas hidráulicas. Para la protección de la tarjeta se en un inicio se colocó dentro de un contenedor con tapa transparente hecha de policarbonato para poder obtener las mediciones de luminosidad, pero esto resulto contraproducente ya que la tarjeta se sobrecalentaba y provocaba que los valores de los sensores de humedad aumentaran el valor de sus mediciones.



Figura 59 Estructura de soporte instalada



Figura 60 Módulo de sistema de muros verdes finalizado

Debido a lo anterior se optó por utilizar una pantalla Stevenson de igual manera que en la tarjeta Enviro Weather, y se colocó en la parte trasera del sistema para reducir la incidencia solar. Para obtener las mediciones de luminosidad se optó por las mediciones obtenidas por el sensor LTR390, el cual se dejó expuesto a la intemperie sin protección.

Finalmente en el nivel de jardinera A se dejó la conexión de la tubería de PVC con dos entradas: una conexión para mangueras de ½ de pulgada y una tubería con tapón sin sellado para un llenado manual y se finalizó el sistema como se muestra en la figura 60.

6. Procesamiento de datos

6.1. Mediciones directas desde la tarjeta Enviro

Para poder procesar las mediciones se tiene que conectar cualquier tarjeta Enviro a una computadora con el programa Thonny y se tienen que guardar una copia de la carpeta *uploads*. En esta carpeta se guardan todas las mediciones realizadas antes de ser subidas a Adafruit IO en un formato de archivo “.json”, el cual se puede abrir con cualquier editor de texto.

Para poder trabajar estos archivos se puede usar el programa Microsoft Excel y se indicará a continuación como trabajarlos:

1. Abrir un archivo nuevo de Excel, ir a la pestaña de “Datos”, dar click en “Obtener datos” y seleccionar la opción de un archivo, en este paso hay dos opciones si solo se quiere procesar un archivo .json se selecciona la opción “JSON” y se busca en el explorador de archivos el archivo.
2. Primero se tiene que convertir el archivo a tabla y posteriormente se debe de trasponer la tabla. Después de esto se selecciona la opción de primera fila como encabezados y se selecciona la opción de *expand column* (Aparece como dos flechas a un lado del encabezado de columnas que contengan agrupados varios datos) en la columna readings para obtener las mediciones
3. Posteriormente se selecciona close&load y se tendrá el archivo de Excel con las mediciones casi listo para usarse, lo siguiente por hacer es convertir la hora de la medición que está en UTC a la zona horaria de las mediciones.

4. Finalmente para el caso de la Ciudad de México su zona horaria GMT -6 por lo que se le restaran 6 horas para que las mediciones queden en hora local, esto se puede hacer creando una columna en Excel llamándola Fecha GMT y colocando la siguiente fórmula.

$$t_{GMT-6} = t_{UTC} - \frac{6}{24}$$

Donde t_{UTC} es la celda en la que se tiene el valor del tiempo de la medición.

Con esto ya se tiene todo lo necesario para trabajar los datos debido a que el archivo .json mantiene las mediciones con formato de número.

6.2. Mediciones de Adafruit IO

En el caso de obtener las mediciones de

Adafruit IO es más sencillo ya que permite bajar directamente los datos en formato .CSV para cada una de las diferentes mediciones. El único trabajo que se tiene que realizar de igual manera que en el caso anterior es el de ajustar la hora a la zona horaria de donde se toman las mediciones.

El valor de la fecha y hora de medición en este caso vienen en formato de texto por lo que se requiere hacer una conversión a formato de número, para esto se recomienda que se genere una nueva columna donde se coloque la siguiente función de Excel:

$$= \text{FECHANUMERO}(\text{EXTRAE}(\text{FF}, 1, 17)) + \text{HORANUMERO}(\text{EXTRAE}(\text{FF}, 12, 8)) - 6/24$$

Donde FF es el valor correspondiente al tiempo en UTC.

En la tabla 7 se muestra un ejemplo de cómo se vería con una muestra de una medición bajada de Adafruit IO:

| created_at | Fecha (GMT-6) |
|-------------------------------|--|
| 2023-11-15 17:45:08 UTC | =FECHANUMERO(EXTRAE(FF,1,17))+HORANUMERO(EXTRAE(FF,12,8))- 6/24 |

Tabla 7 Ejemplo de función de Excel para cambio de hora de UTC a GMT-6

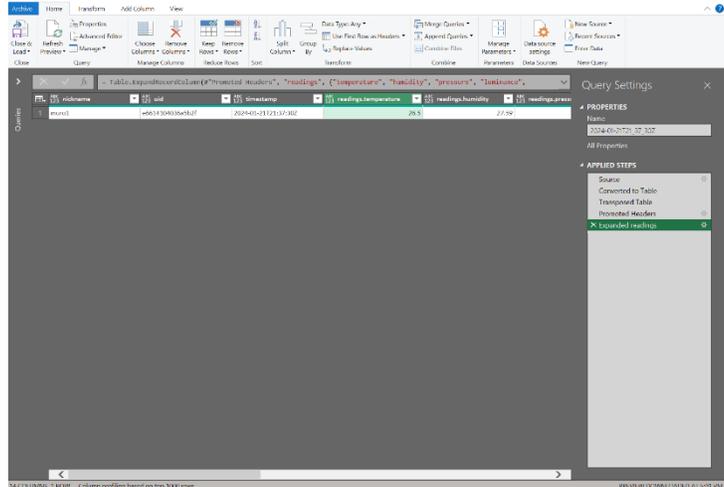


Figura 61 Captura de pantalla con pasos para el procesamiento de archivos .json mediante excel

6.3. Automatización de captura de mediciones

Dentro de la plataforma Adafruit IO se puede conectar a los servicios de automatización IFTTT y Zapier, los cuales permiten capturar los valores de las mediciones en archivos de Google Sheets mediante la vinculación de una cuenta de Gmail.

Para el caso de IFTTT se tienen tres tipos de cuentas: Gratis (solo permite la captura de dos mediciones cada hora), Pro (20 mediciones cada 5 min) y Pro+ (sin límite de mediciones cada 5 min). En cualquiera de las cuentas se tiene un límite de captura de 20,000 mediciones por archivo de Google Sheets y se tiene un archivo por cada variable de medición, una vez que se llega a este número se requiere crear un nuevo archivo de almacenamiento de mediciones.

Mientras que para Zapier se tienen cinco tipos de cuentas: Gratis (100 mediciones al mes), Starter (750-1500 mediciones la mes), Professional (2 000 a 2 millones de mediciones al mes) y Team (2 000 a 2 millones de mediciones al mes). Además Zapier permite almacenar varias mediciones en un mismo archivo.

Comparando los dos servicios se observa que el que mejor se adecúa a las condiciones del prototipo es IFTTT, ya que este no tiene un límite de mediciones tan estricto como Zapier, aun así se experimentó con ambos servicios y se encontró que la cuenta gratuita de Zapier se agotaron las acciones disponibles de captura de mediciones en dos días, mientras que la cuenta gratuita de IFTTT después de varias semanas no se le agotaron las acciones de captura de mediciones.

En el servicio gratuito de IFTTT se encontró una problemática para la captura de mediciones, de vez en cuando solo se captura una de las dos mediciones disponibles, esto resulta en huecos en la captura de mediciones, o en el peor de los casos, que una de las mediciones deje de ser almacenada en su respectivo archivo por horas, faltaría comprobar si con el cambio a una cuenta Pro este problema se puede resolver.

A pesar de las deficiencias que presentan estos servicios siguen funcionando como una manera de generar un respaldo automático de las condiciones climatológicas dentro del microclima del prototipo.

6.4. Unidades de las mediciones

En la tabla 8 se agrupa cada medición con su respectiva unidad, en el caso de la dirección del viento en la tabla 9 se muestran las direcciones a los cuales corresponden los valores del sensor.

| Medición | Unidad |
|----------------------|---|
| Temperatura | Grados Celsius [°C] |
| Humedad relativa | Porcentual [%] |
| Presión atmosférica | Hectopascales [hPa] |
| Luminancia | Luxes [lx] |
| Humedad de suelos | Porcentual [%] |
| Lluvia | Milímetros de lluvia [mm] |
| Promedio de lluvia | Milímetros de lluvia por segundo [mm/s] |
| Velocidad del viento | Metros por segundo [m/s] |
| Dirección del viento | Ángulo desde el norte hacia el este [°] |

Tabla 8 Unidades de medición de los sensores del prototipo

| Valor en grados [°] | Dirección del viento |
|---------------------|----------------------|
| 0 | Norte [N] |
| 45 | Noreste [NE] |
| 90 | Este [SE] |
| 135 | Sureste [SE] |
| 180 | Sur [S] |
| 225 | Suroeste [SO] |
| 270 | Oeste [O] |
| 315 | Noroeste [NO] |

Tabla 9 Valores de dirección del viento en base al valor en grados del prototipo

7. Mantenimiento del sistema

Para que el sistema se encuentre en las mejores condiciones se muestra en la tabla 10 un desglose de actividades que se deben de realizar, indicando en ella su periodicidad. Estas actividades son de mantenimiento preventivo (mantenimiento antes de una falla o accidente) y puede que sucedan fallas que requieran un mantenimiento correctivo como lo sería.

| Actividad | Descripción | Diario | Quincenal | Trimestral | Semestral |
|---|--|--------|-----------|------------|-----------|
| Actualización de software | El software Enviro recibe actualizaciones donde se agrupan varias mejoras realizadas por la comunidad. Debido a esto no tienen una periodicidad establecida por lo que se recomienda verificar cada seis meses si hay una versión nueva. Antes de realizar la actualización se tiene que hacer una copia de seguridad del código que fue modificado para acoplarlo con la versión más reciente. | | | | X |
| Limpieza de los reservorios de agua | En los reservorios se pueden acumular sólidos que puedan dañar al sistema de bombeo, por esta razón se tiene que limpiar. | | | X | |
| Llenado de los reservorios | Es una buena práctica llenar el tanque cada dos semanas sin importar si todavía tiene agua en los reservorios. | | X | | |
| Limpieza de paneles solares | Al estar a la intemperie los paneles solares tienden a ensuciarse por lo que se deben de limpiar para garantizar que tengan el mejor funcionamiento. | | | X | |
| Revisión de cableado | El cableado puede verse afectado por encontrarse en la intemperie, por lo que se debe de revisar y si se encuentra un cable deteriorado reemplazarlo. | | | | X |
| Reemplazo de bombas por mal estado | Para el tipo de bomba empleado no se tienen datos técnicos que nos indiquen su tiempo de vida útil, por esta razón se contempla cada seis meses se reemplacen los equipos dañados por otros que trabajen con 3.3 V. | | | | X |
| Revisión de fugas en reservorios o tuberías | Puede que con el paso del tiempo los reservorios y las tuberías se degraden y generen fugas, debido a esto es bueno hacer una revisión y verificar que no se vea, ni se escuche, goteo en el sistema. Si se presentan fugas taparlas o en caso de que sean muy grandes reemplazar los reservorios o tuberías. | | | X | |
| Revisión de sistema de riego | Debido a que las mangueras se encuentran expuestas a los rayos del sol estas se pueden degradar, por lo que pueden presentar fugas dentro de las jardineras evitando una distribución uniforme del agua. También pueden taparse los aspersores por lo que si se tiene un elemento dañado o no funcional se debe de reparar, en caso de que se pueda, y si no, reemplazarlo. | | | X | |
| Revisión de dashboard | En el dashboard de Adafruit IO se puede hacer una revisión general de los niveles de humedad de suelo y si se tiene un valor irregular esto puede servir como una indicación para hacer una revisión del sistema y ver si presenta fallas. | X | | | |

Tabla 10 Actividades de mantenimiento del sistema

8. Análisis del prototipo

8.1. Análisis económico

En cuanto al tema de costos, solamente por la implementación del sistema de monitoreo y control, excluyendo la mano de obra, estructura de acero, jardineras y reservorios, plantas en la tabla 11 se muestra el costo por módulo, sin contar la implementación de la tarjeta Enviro Weather ya que esta se muestra en la tabla 12.

| Material | Conversión dólar a pesos (2024) | 18 | Costo Unitario [pesos] | Costo total [pesos] |
|---|---------------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------|
| | Número requerido por módulo | Costo Unitario [dólares] | | |
| Enviro Grow (Incluye 3 sensores de humedad, 3 bombas sumergible, Paquete de 3 baterías doble A) | 1 | 53.75 | 967.5 | 967.5 |
| Panel solar de 6V 2W | 1 | 26.19 | 471.42 | 471.42 |
| Extensión cable 2.1 mm DC | 1 | 2.95 | 53.1 | 53.1 |
| Adaptador 1.1-1.3mm a 2.1 mm DC | 1 | 1.5 | 27 | 27 |
| Tarjeta para cargar baterías de litio con panel solar | 1 | 14.95 | 269.1 | 269.1 |
| Cable Picoblade 2P 300 mm extensión | 3 | 2.94 | 52.92 | 158.76 |
| Cable JST-SH 2P 100 mm terminación macho-macho | 1 | 0.95 | 17.1 | 17.1 |
| Cable JST-SH 2P 500 mm extensión con apagador | 1 | 2.95 | 53.1 | 53.1 |
| Cable JST-SH 2P 500 mm extensión | 1 | 1.95 | 35.1 | 35.1 |
| Sensor LTR390 Stemma Qt | 1 | 4.95 | 89.1 | 89.1 |
| Cable Stemma Qt 500 mm | 1 | 2.38 | 42.84 | 42.84 |
| Pantalla Stevenson | 1 | - | 338 | 338 |
| Sistema de riego (Manguera, aspersores, etc.) | 1 | - | 300 | 300 |
| Bolsa para baterías LiPo | 1 | - | 140 | 140 |
| Gabinete de plástico 11.2x2.2x5.7cm | 1 | - | 35 | 35 |
| Cable Jst-Sh 3p | 3 | - | 70 | 210 |
| Batería LiPo 3.7V 2500mAh | 1 | - | 210 | 210 |
| Costo total de implementación | | | | 3417.12 |

Tabla 11 Costo de implementación del sistema de monitoreo y control

| Material | Conversión dólar a pesos | 18 | Costo Unitario [pesos] | Costo total [pesos] |
|---|-----------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------|
| | Número requerido por módulo | Costo Unitario [dólares] | | |
| Enviro Weather (Incluye sensores de lluvia y , Paquete de 3 baterías doble A) | 1 | 162 | 2916 | 2916 |
| Stevenson Screen | 1 | - | 338 | 338 |
| Costo total de implementación | | | | 3254 |

Tabla 12 Costo de implementación de la tarjeta Enviro Weather

El costo total del sistema de control y monitoreo es de **\$6,671**, pero este se puede reducir si se deciden remover componentes. Para que el sistema sea más económico, este puede trabajar solamente con una tarjeta Enviro Grow a base de baterías doble A, con una funda Stevenson para su protección, este costo es de **\$1,974.26** y su cálculo se muestra en la tabla 12.

| Material | Conversión dólar a pesos | 18 | Costo Unitario [pesos] | Costo total [pesos] |
|---|-----------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------|
| | Número requerido por módulo | Costo Unitario [dólares] | | |
| Enviro Grow (Incluye 3 sensores de humedad, 3 bombas sumergible, Paquete de 3 baterías doble A) | 1 | 53.75 | 967.5 | 967.5 |
| Cable Picoblade 2P 300 mm extensión | 3 | 2.94 | 52.92 | 158.76 |
| Stevenson Screen | 1 | - | 338 | 338 |
| Sistema de riego (Manguera, aspersores, etc.) | 1 | - | 300 | 300 |
| Cable Jst-Sh 3p | 3 | - | 70 | 210 |
| Costo total de implementación | | | | 1974.26 |

Tabla 13 Costo de implementación de la tarjeta Enviro Grow sin accesorios extra

8.2. Áreas de oportunidad

Las áreas de oportunidad que se encontraron en el prototipo son las siguientes:

- Implementación de una conexión directa a la red hidráulica de la edificación:
Gracias a que la red hidráulica del prototipo es de PVC, está se puede acoplar fácilmente a las redes hidráulicas comúnmente usadas en edificaciones, pero al tratarse de reservorios a presión atmosférica si estos se sobrellenan generaran perdidas de agua, debido a esto se

requiere de un sistema de control que habilite el llenado de los tanques de manera automatizada.

Una de las opciones que fue contemplada para lo anterior fue la adición de una válvula de solenoide de 12 V, la cual permitiría el paso del agua conforme sea necesario el llenado de los tanques. La razón por la cual no se implementó en este prototipo fue debido al voltaje de su funcionamiento, ya que la RPI Pico W solo permite una salida máxima de 3.3 V y se requeriría de otra fuente que pueda suministrar este voltaje y en la zona donde se colocó el sistema se dificulta el acceso a la red eléctrica.

Otra razón por la que no se implementó es debido a que se requeriría de un sensor más para la medición del nivel del agua. De los sensores investigados se encontraron dos: un sensor ultrasónico y un sensor resistivo de agua, ambos presentan varias complicaciones en cuanto al tema de mantenimiento, ya que los sensores resistivos se degradan fácilmente, mientras que un sensor ultrasónico requiere un mayor tamaño que el disponible en los reservorios del sistema.

- Dependencia a Adafruit IO para estar al tanto de las condiciones del sistema:
Para conocer las condiciones del estado del sistema se requiere de una conexión a la plataforma Adafruit IO, si se llegan a presentar problemas de red o si la plataforma sufre de un fallo, no se podría conocer el estado actual del sistema. Por esta razón un área de oportunidad sería la de desarrollar un sistema que funcione como servidor dentro de la misma red local a la cual se conecte el sistema así se evitaría la dependencia de Adafruit IO.
- Implementación de un mayor número de especies vegetales:
Para el módulo del sistema solo se emplearon cuatro especies vegetales, pero la posibilidad de adicionar otras especies que no se hayan utilizado en otros sistemas de muros verdes es un área de oportunidad.
- Suministrar al sistema con agua pluvial:
Debido a que el prototipo fue colocado a nivel de azotea en una pared perimetral y a la falta de espacio alrededor del mismo se dificultó la instalación de un sistema de captación de agua pluvial que sirviera de fuente de alimentación al prototipo.
- Mayor procesamiento y análisis de datos:

Las mediciones recabadas por el sistema solo son datos a los cuales no se les ha hecho un procesamiento ni análisis detallado, estos datos podrían ser usados para hacer análisis de tendencias meteorológicas o para ver cómo afecta el crecimiento de las especies vegetales las diferentes condiciones que se pueden medir con el sistema.

- Reducción de microcontroladores de importación:

Las tarjetas de microcontroladores y los sensores que se utilizaron son tecnología importada, en el caso de las tarjetas Enviro son provenientes de Inglaterra y para el resto son provenientes de los Estados Unidos. Esto provoca un aumento en el costo y la dificultad de adquisición por lo que si en un futuro se llegara a desarrollar un mayor número de microcontroladores y sensores en el mercado nacional se podría optar por su utilización para no tener una dependencia a tecnología de otros países.

- Implementación de diferentes materiales:

Al usarse fibra de vidrio se dificultó la modificación de las jardineras utilizadas, esto debido a la dificultad y riesgo de su manejo, por lo que un área de oportunidad sería utilizar otros materiales que puedan soportar las condiciones de intemperismo y que no resulte difícil su manejo.

9. Conclusiones

Se diseñó un sistema de muros verdes inteligentes, en el cual se implementó un sistema de control y monitoreo basado en las tarjetas Enviro Grow y Enviro Weather que cuentan con el microcontrolador Raspberry Pi Pico W.

La clasificación que se le asigna es el de un sistema modular de muros verdes inteligentes alimentado por energía solar, en el que cada módulo cuenta con tres niveles de jardineras, donde se puede tener diferentes valores de humedad de suelo en cada nivel.

Tocando el tema de las dificultades que se tuvieron para la construcción del muro verde su principal problemática fue la adquisición de insumos y materiales, ya que para la tarjeta Enviro Grow y el sensor LTR-390 no se logró encontrar en tiendas nacionales y se tuvo que recurrir a su importación.

Mientras que para las jardineras de fibra de vidrio se complicó encontrar modelos con el tamaño y calidad deseados, ya que diferentes proveedores tienen diferentes presentaciones y grosores de pared, y en algunas de ellas se encontraron que las paredes eran demasiado delgadas, lo que provocaba que se rompieran fácilmente. Por esta razón encontrar un proveedor que cumpliera en tamaño y calidad fue complicado para una escala de construcción baja como lo fue la elaboración del prototipo.

Finalmente quisiera decir que la construcción de este sistema es solo un pequeño paso a la investigación y construcción de los muros verdes, ya que todavía falta más línea de investigación acerca de que tipos de plantas y en qué condiciones pueden tener un crecimiento adecuado. Y que el prototipo desarrollado tiene todavía muchas áreas de oportunidad en las cuales se puede mejorar, y por esto mismo espero que el desarrollo de este sistema siga creciendo más allá de lo que abarca este documento.

Bibliografía

- Aristegui Noticias. (28 de 05 de 2019). *Aristegui Noticias*. Obtenido de Vía Verde: el proyecto que promete tapizar de plantas el Periférico con transparencia: <https://aristeguinoicias.com/2805/kiosko/via-verde-el-proyecto-que-promete-tapizar-de-plantas-el-periferico-con-transparencia/>
- Barrio Andrés, M. (2018). *Internet de las cosas*. Madrid: REUS.
- Boubel, R. W., Fox, D. L., Turner, D. B., & Stern, A. C. (1994). *Fundamentals of Air Pollution*. San Diego: Academic Press.
- Chávez, G. (08 de 07 de 2019). *La tecnología que hizo verde al Periférico y fue premiada por el WEF*. Obtenido de Obras Expansión: <https://obras.expansion.mx/infraestructura/2019/07/08/la-tecnologia-que-hizo-verde-al-periferico-y-fue-premiada-por-el-wef>
- DOF. (2023). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. CDMX: Diario Oficial de la Federación.
- Ecoyaab. (s.f.). *Ecosistemas verticales*. Obtenido de <https://www.ecoyaab.com/tecnologiajardinesverticales>
- Erell, E., Pearlmutter, D., & Williamson, T. (2011). *Urban Microclimate*. New York: Earthscan.

- Fernández Cañero, R., Pérez Urrestarazu, L., & Franco Salas, A. (2015). NATURACIÓN URBANA Y JARDINERÍA VERTICAL: DE LAS FACHADAS VERDES A LOS MUROS VEGETALES. *Parjap*, 6-11.
- Fundación española ciencia y tecnología. (2004). *Meteorología y climatología*. Ministerio de educación y ciencia.
- Generación verde. (s.f.). *Jardines Verticales*. Obtenido de <https://generacionverde.com/jardines-verticales2/>
- Giobellina, B., Medina, S., Pomazán, S., & Sánchez Gavier, C. (2020). *Infraestructuras verdes : desde el territorio a la cubierta habitable : Serie : Innovaciones para la sostenibilidad en vivienda, ciudad y territorio. Para el caso de Córdoba*. Córdoba: Editorial de la Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño de la Universidad Nacional de Córdoba.
- Gionfra, S., Kelder, E., Aivalioti, S., & Caitlin, B. (22 de 05 de 2023). *Embracing biodiversity: Paving the way for nature-inclusive cities*. Obtenido de iucn: <https://www.iucn.org/story/202305/embracing-biodiversity-paving-way-nature-inclusive-cities>
- González Betancourt, R. (2011). *DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO PARA TANQUES DE MADURACIÓN DE GELATINA CON MICROCONTROLADORES PIC*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Aragón.
- Goodhew, T., & Chaifox. (23 de 06 de 2023). *LTR390 micropython code*. Obtenido de Pimoroni: <https://forums.pimoroni.com/t/ltr390-micropython-code/22314/6>
- Guzmán Flores, B. E. (2017). *La integración de Humedales Artificiales con Muros Verdes para contribuir al cumplimiento de la norma NMX-AA-164-SCFI-2013 y el PAAS. Un sistema de tratamiento descentralizado de agua gris para la Vivienda de Interés Social*. Ciudad Nezahualcóyotl: UNAM.
- Halfacree, G., & Everard, B. (2021). *Get started with MicroPython on Raspberry Pi Pico*. Cambridge: Raspberry Pi Press.
- Halgamuge, M. N., Bojovschi, A., Fisher, P. M., Le, T. C., Adeloju, S., & Murphy, S. (2021). Internet of Things and autonomous control for vertical cultivation walls Internet of Things and autonomous control for vertical cultivation walls. *Elsevier*.

- Herath, H., Halwatura, R., & Jayasinghe, G. (2018). Evaluation of green infrastructure effects on tropical Sri Lankan urban. *Urban Forestry & Urban Greening*, 212-222.
- Lara, G. (10 de Abril de 2023). *El 'boom' de los jardines verticales que lleva a Vía Verde al extranjero*. Obtenido de Obras Expansión: <https://obras.expansion.mx/infraestructura/2023/04/10/via-verde-jardines-verticales-mexico-en-el-extranjero>
- Lite-on Optoelectronics. (02 de 03 de 2016). Optical Sensor Product Data Sheet LTR-390UV-01. New Taipei City, Taiwan.
- Loera Saldivar, M. C. (2023). *Comparación de técnicas de percepción remota para la detección de islas de calor en la Ciudad de México y zona conurbada a partir de imágenes satelitales Landsat 8 OLI y datos puntuales*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, Facultad de ingeniería.
- López Jiménez, N. (2018). *Propuesta para el control de ruido ambiental en función de frecuencias de emisión mediante barreras vegetales*. CDMX: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, FACULTAD DE INGENIERÍA.
- Noria Govea, M., & Pérez Rivas, J. N. (2020). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE AZOTEA Y MUROS VERDES EN UNA VIVIENDA ECOLÓGICA A ESCALA*. Ciudad Nezahualcóyotl: UNAM.
- Paisajismo Digital*. (04 de Agosto de 2019). Obtenido de Vía Verde: Oxígeno para la CDMX con jardines verticales: <https://paisajismodigital.com/blog/via-verde-el-proyecto-que-oxigena-la-ciudad-de-mexico-con-jardines-verticales/>
- Pimoroni. (25 de Agosto de 2023). *Pimoroni/Enviro*. Obtenido de Github: <https://github.com/pimoroni/enviro>
- Plantica. (s.f.). *Jardines verticales*. Obtenido de <https://www.plantica.mx/jardinesverticales>
- Ramo, E. (16 de 02 de 2017). *Vía Verde: un jardín vertical en CDMX*. Obtenido de Selecciones: <https://selecciones.com.mx/via-verde-un-jardin-vertical-en-cdmx/>
- Riva Sánchez, Y. A. (2019). *EFICIENCIA DEL USO DE MUROS VERDES PARA DISMINUIR LOS EFECTOS NEGATIVOS DE LA PERDIDA DE ÁREAS VERDES EN LAS CIUDADES CON EL USO DE MATERIALES RECICLADOS*. Córdoba: UCO PRESS.

- Rizwan, A. M., Dennis, Y. C., & Liu, C. (2007). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 120-128.
- Sánchez Salinas, E., Ortiz Hernández, L., & Castrejón Godínez, M. (2014). *Contaminación Urbana del Aire: Aspectos fisicoquímicos, microbiológicos y sociales*. Cuernavaca: Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- TeQuieroVerdemx. (s.f.). *Instalación de muros verdes naturales*. Obtenido de <https://tqv.mx/instalacion-de-muros-verdes-naturales/>
- Upton, E. (30 de 06 de 2022). *Raspberry Pi Pico W: your \$6 IoT platform*. Obtenido de RaspberryPi: <https://www.raspberrypi.com/news/raspberry-pi-pico-w-your-6-iot-platform/>
- Urbano-López de Meneses, B. (2013). NATURACIÓN URBANA, UN DESAFÍO A LA URBANIZACIÓN. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 226-235.
- Vázquez González, A. B., Cesar Valdez, E., Fuentes Gea, V., González Reyes, C. E., Jacintos Nieves, A., & Sepulveda Hirose, R. T. (2020). *Ingeniería ambiental - Aplicaciones*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- WHO. (2002). *Global Solar UV Index A Practical Guide*. WHO.
- Yakubu, H., & Reine, R. (2019). Performance Analysis of Green-Wall Infrastructure Performance Analysis of Green-Wall Infrastructure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.