



Universidad Internacional de La Rioja
Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología - ESIT

Máster Universitario en Internet De Las Cosas / INTERNET OF
THINGS (IoT)

Diseño de arquitectura y dispositivo IoT para medición de cultivos de tomate en un sistema de invernadero casero

Trabajo fin de estudio presentado por:	Luis Enrique Cadena Jiménez
Tipo de trabajo:	Depósito TFM
Director/a:	Francisco Sánchez Sáez
Fecha:	20-07-2022

Resumen

El presente trabajo propone una solución a la problemática presente en la gestión agrícola de cultivos de tomate riñón en zonas geográficas remotas que se llevan a cabo mediante el uso de sistemas de invernadero, a través de la implementación de una arquitectura y dispositivo IoT que permita el control y monitorización de variables ambientales, la transmisión remota de los datos de monitoreo usando técnicas de comunicación de larga distancia y bajo consumo de potencia por medio de tecnología LoRa y el posterior procesamiento de los datos en plataformas de cloud computing, usando para esto la base propuesta por la metodología secuencial de gestión de proyectos.

Todo esto con el fin de obtener un prototipo funcional que genere información de los cultivos de tal manera que posibilite la mejora de los procesos agrícolas y por consiguiente la obtención de productos alimenticios de alta calidad.

Palabras clave: Agricultura de precisión, LoRa, IoT, Amazon Web Services, Python, ESP32

Abstract

The current work proposes a solution to the problems in the agricultural management of tomato crops in remote geographical areas based on greenhouse systems, through the implementation of an architecture and IoT device that allow the control and monitoring of environmental variables, remote transmission of monitoring data using long-distance communication techniques and low power consumption through LoRa technology and subsequent processing of data on cloud computing platforms, using for this the base proposed by the sequential project management methodology.

All this in order to obtain a functional prototype that generates crops information that enables the improvement of agricultural processes and therefore the obtaining of high quality food products.

Keywords: Precision Farming, LoRa, IoT, Amazon Web Services, Python, ESP32

Índice de contenidos

1. Introducción	12
1.1. Motivación	13
1.2. Planteamiento del trabajo	14
1.3. Estructura de capítulos	15
2. Contexto y estado del arte	17
2.1. Conceptos Básicos y Problemática	17
2.1.1. Sistemas de Invernadero	17
2.1.2. Problemática.....	20
2.2. Proyectos relacionados con el tema del TFE	21
2.2.1. Tesis de Pregrado	21
2.3. Tecnologías relacionadas con el tema del TFE	22
2.3.1. Microcontroladores	22
2.3.2. Sensores y Actuadores	24
2.3.3. Comunicación de Datos	28
2.3.4. Cloud Computing	30
2.3.5. Internet de las cosas (IoT)	31
2.4. Conclusiones sobre el estado del arte	33
3. Descripción general de la contribución del TFE	35
3.1. Objetivos	35
3.2. Metodología del trabajo	36
3.3. Descripción general de las partes o componentes de la propuesta	37
4. Desarrollo específico de la contribución	43
4.1. Desarrollo del sistema de monitoreo y control del cultivo	43
4.1.1. Definición de Requisitos	43

4.1.2.	Diseño del Sistema	43
4.1.3.	Implementación del sistema diseñado.....	44
4.1.4.	Pruebas de Operación	57
4.2.	Desarrollo del gateway de comunicación.....	60
4.2.1.	Definición de Requisitos	60
4.2.2.	Diseño del Sistema	60
4.2.3.	Implementación del sistema diseñado.....	61
4.2.4.	Pruebas de Funcionamiento.....	67
4.3.	Ingesta de datos desde el gateway hacia la plataforma de cloud computing	70
4.3.1.	Definición de Requisitos	70
4.3.2.	Diseño del Sistema	70
4.3.3.	Implementación del sistema diseñado.....	71
4.3.4.	Pruebas de Operación	74
4.4.	Desarrollo del sistema de visualización de datos	75
4.4.1.	Definición de Requisitos	75
4.4.2.	Diseño del Sistema	75
4.4.3.	Implementación del sistema diseñado.....	76
4.4.4.	Pruebas de Operación	80
4.5.	PRUEBAS DEL PROTOTIPO EN EL SISTEMA DE INVERNADERO CASERO.....	83
4.5.1.	Montaje del Invernadero Casero.....	83
4.5.2.	Instalación de Sensores y Bomba de Agua.....	85
4.5.3.	Período de Observación y Pruebas.....	87
4.5.4.	Observaciones	94
4.5.5.	Presupuesto y Planificación.....	95
5.	Conclusiones y trabajos futuros	98

5.1. ANÁLISIS DE OBJETIVOS	98
5.2. CONCLUSIONES	99
5.3. OPORTUNIDADES DE MEJORA Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS	101
Referencias bibliográficas	103
Anexo A. Código Implementado	106
Código Dispositivo IoT	106
Código Gateway	108

Índice de figuras

Figura 1. Microcontrolador M5GO	22
Figura 2. Sensor de Temperatura, Humedad y Presión (ENV. III)	24
Figura 3. Unidad TVOC/eCO2	25
Figura 4. Unidad Dlight	26
Figura 5. Unidad Watering.....	27
Figura 6. Módulo Lora 868 MHz	29
Figura 7. Esquema del protocolo MQTT	30
Figura 8. Arquitectura de Referencia IoT	32
Figura 9. Arquitectura de referencia del presente trabajo	32
Figura 10. Fases de gestión de proyectos basado en la metodología secuencial	36
Figura 11. División en fases de la solución propuesta.....	37
Figura 12. Arquitectura e Integración de Tecnologías	40
Figura 13. Planificación General del proyecto.....	42
Figura 14. Diseño conceptual del Sistema (Fase 1: Sistema de Monitoreo y Control)	44
Figura 15. Distribución de Pines GPIO del dispositivo M5GO (Vista Interna)	45
Figura 16. Dispositivo M5GO (Vista Frontal)	46
Figura 17. Dispositivo M5GO (Puertos Grove A, B y C)	46
Figura 18. Distribución de Pines Módulo LoRa.....	47
Figura 19. Distribución de Pines módulo de energía M5GO Bottom	47
Figura 20. Componente Pa.HUB (Hub de puerto A)	48
Figura 21. Sensores de Temperatura, Humedad, CO ₂ y Luminosidad	49
Figura 22. Bomba de succión de agua (Watering Pump)	50
Figura 23. Conexión de hardware del sistema de monitoreo y control.....	51
Figura 24. Flujo de programación para el monitoreo de variables ambientales	53

Figura 25. Flujo de programación del Control de Riego.....	54
Figura 26. Conformación de la cadena de transmisión (variable pack)	55
Figura 27. Inicialización y configuración del módulo LoRa en 915 MHz	56
Figura 28. Flujo de Programación para transmisión LoRa del string de información	57
Figura 29. Medición de variables y discriminación de umbrales	57
Figura 30. Conformación de string de información ['26.60', '51.54', '400', '82']	58
Figura 31. Activación de proceso de riego	58
Figura 32. Prueba de transmisión – Recepción LoRa 915 MHz.....	59
Figura 33. Diseño Conceptual del Sistema (Fase 2: Gateway de Comunicación)	60
Figura 34. Disposición Final de hardware (módulos apilados).....	62
Figura 35. Flujo de programación conexión Wi-Fi.....	63
Figura 36. Inicialización y configuración del módulo LoRa.....	64
Figura 37. Lógica de programación para recibir las tramas y visualizar en LCD	65
Figura 38. Creación de pares clave/valor en formato JSON.....	66
Figura 39. Inicialización de la conexión hacia la plataforma AWS	66
Figura 40. Publicación del tópico core2/env del string en formato JSON.....	67
Figura 41. Suscripción al tópico "core2/env" publicado por el gateway.....	68
Figura 42. String recibido en el gateway a través de LoRa (b"['23.36', '59.22', '474', '87']")	68
Figura 43. Llegada de los datos desde el gateway a la plataforma AWS	69
Figura 44. String recibido en el gateway a través de LoRa (b"['23.33', '59.37', '589', '76']")	69
Figura 45. Llegada de los datos desde el gateway a la plataforma AWS	69
Figura 46. Diseño Conceptual del Sistema (Fase 3: Ingesta de Datos a Plataforma Cloud Computing).....	71
Figura 47. Creación del objeto "m5stack" en AWS IoT Core	72
Figura 48. Generación de Certificados Digitales para el objeto "m5stack"	72

Figura 49. Política "AllowAll" asociada al objeto "m5stack"	73
Figura 50. Parámetros de Conexión del Gateway hacia la Plataforma AWS	74
Figura 51. Llegada de datos desde el Gateway a la plataforma AWS a través de MQTT	74
Figura 52. Diseño Conceptual del Sistema (Fase 4: Sistema de Visualización de Datos).....	76
Figura 53. Creación de regla de direccionamiento en AWS IoT Core	76
Figura 54. Consulta SQL de prueba sobre el conjunto de datos tfmdata_dataset	77
Figura 55. Diseño de dashboard con las variables del conjunto de datos tfmdata_dataset ...	78
Figura 56. Dashboard para la variable 'Humedad'	79
Figura 57. Programación de actualización de conjunto de datos por hora	79
Figura 58. Validación de tráfico en el canal datatfm_channel.....	80
Figura 59. Variación temporal de la variable Temperatura en el dashboard (Acceso Web) ...	81
Figura 60. Dashboard de la variable Temperatura en la aplicación móvil Quicksight	82
Figura 61. Filtro de 5 horas aplicado a la variable 'Humedad'	82
Figura 62. Estructura prefabricada de invernadero casera.....	83
Figura 63. Montaje de paredes laterales.....	84
Figura 64. Armado final de la estructura de invernadero casero	84
Figura 65. Montaje de sensores y bomba de agua en la maceta de cultivo	85
Figura 66. Fijación de sensores de temperatura, humedad y CO ₂ dentro del invernadero	86
Figura 67. Fijación de sensor de luminosidad en pared superior del invernadero.....	86
Figura 68. Montaje final del sistema de invernadero casero.....	87
Figura 69. Métricas de conexión MQTT al módulo AWS IoT Core	88
Figura 70. Métricas de mensaje entrantes de IoT Core recibidos en IoT Analytics	89
Figura 71. Actualización del conjunto de datos 'datatfm_dataset'	89
Figura 72. Trabajos de actualización automática programados en el conjunto de datos	90
Figura 73. Errores en la ingesta de datos de AWS IoT Analytics	90

Figura 74. Disparador del Control de Riego Automático.....	91
Figura 75. Registros de Temperatura (28/06/2022)	92
Figura 76. Registros de Humedad (28/06/2022).....	93
Figura 77. Registros de Concentración de Dióxido de Carbono (28/06/2022)	93
Figura 78. Registros de Luminosidad (28/06/2022)	94
Figura 79. Planificación de Actividades	96
Figura 80. Diagrama de Gantt	97

Índice de tablas

Tabla 1. Especificaciones Técnicas microcontrolador M5GO.....	23
Tabla 2. Especificaciones Técnicas Unidad ENV. III	24
Tabla 3. Especificaciones Técnicas Unidad TVOC/eCO2.....	25
Tabla 4. Especificaciones Técnicas Unidad Dlight	26
Tabla 5. Especificaciones Técnicas Unidad Watering.....	27
Tabla 6. Especificaciones Técnicas Módulo LoRa 868 MHz.....	29
Tabla 7. Descripción general de materiales	41
Tabla 8. Asignación de puerto en el dispositivo Pa.HUB.....	51
Tabla 9. Asignación de variables de cada sensor	52
Tabla 10. Costos de componentes	95

Introducción

El presente trabajo propone la aplicación de los conocimientos adquiridos en el Máster Universitario de Internet de las Cosas (Internet of Things) para diseñar una arquitectura y dispositivo IoT¹ que permita realizar el monitoreo de parámetros esenciales en los cultivos de tomate riñón basados en sistemas de invernadero, con el fin de dar solución a la necesidad de contar con cultivos de calidad y sobre todo a la tecnificación de dicha actividad a través del uso de tecnología IoT.

Debido a la creciente demanda de volumen, calidad y periodicidad en la producción de cultivos de tomate dentro del sector agroalimentario, en los últimos años se ha venido dando un proceso de renovación continúa en este campo, que ha dado lugar a la incorporación del uso de tecnología que permita el monitoreo y automatización de los procesos involucrados en la producción agrícola de tomate en todas sus fases (Plantación, Monitoreo, Cosecha, Empaquetado y Transporte). Es así que surge el Internet de las Cosas, conocido como IoT, por sus siglas en inglés, como una solución técnica para integrar elementos de uso cotidiano en sistemas de conexión global a través de Internet. Dicha tecnología actualmente está desarrollándose de una manera vertiginosa y justamente uno de los campos en los cuales presenta gran aplicabilidad es la producción agropecuaria.

La planta de tomate riñón (*Solanum lycopersicum*), conocido también como tomate o jitomate en diversos lugares del mundo, desde siempre ha sido una de las hortalizas más consumidas a nivel mundial, por ende, es una de las más cultivadas y demandadas, debido a sus aportes nutricionales, así como también por sus usos gastronómicos en la dieta diaria. Sus características botánicas permiten que sea cultivado en ambientes al aire libre y en sistemas de invernadero, por lo que es muy flexible en cuanto a las formas de cultivo y volúmenes de producción, siendo habitual cosecharla a niveles industriales, así como en pequeñas/medianas empresas e incluso en huertos caseros.

Los sistemas de invernadero se han convertido en una técnica muy difundida en el área agrícola para asegurar que la producción se mantenga constante todo el año y no solo por temporadas, debido a que ofrece la capacidad de asegurar condiciones climáticas estables y

¹ IoT: Internet of Things (Internet de las Cosas).

controladas independientes del clima exterior. Es precisamente la necesidad de asegurar y controlar los parámetros ambientales lo que vuelve a los sistemas de invernadero como un caso de aplicación típico en las que la tecnología IoT juegan un papel fundamental en la adquisición de datos de magnitudes físicas (Temperatura, Humedad, etc) y la transmisión de dichos datos a sistemas informáticos donde se almacenan, interpretan, analizan y visualizan, con el fin de adquirir conocimiento sobre los cultivos, controlar las variables que optimizan el desarrollo de los mismos y tomar las mejores decisiones en beneficio de una gestión agrícola de calidad.

En virtud de lo expuesto, el presente trabajo se centrará en la fase de monitoreo de los cultivos de tomate, donde es de vital importancia el conocimiento y control de las variables físicas más importantes para el crecimiento de dicha hortaliza, la transmisión de dichos datos hacia sistemas que permitan el direccionamiento de los mismos hacia plataformas donde se almacenen y visualicen, con el fin de dar a los usuarios la información suficiente que les permita tomar las acciones necesarias para garantizar la calidad final del producto. Para esto se construirá un sistema de invernadero casero donde se incorporará un prototipo de dispositivo IoT, el cual sobre la base de una arquitectura de Internet de las Cosas permitirá el monitoreo y control del ambiente interno del invernadero, la transmisión de datos hacia plataformas en la nube de internet y la visualización de información referente a los cultivos, sirviendo como punto de partida para una futura implementación de este prototipo en sistemas de invernadero industriales.

1.1.Motivación

La realización del presente trabajo es motivada debido a la utilidad que genera la incorporación de la tecnología de Internet de las Cosas como parte de los procesos inmersos en el sector agrícola, con el fin de dar solución a la necesidad de garantizar la obtención de cultivos de calidad que favorezcan a la producción y calidad alimentaria.

Además, es de particular interés presentar una alternativa que solvete la transmisión de datos en sistemas de invernadero ubicados en zonas geográficas remotas, en las que no se cuenta con implementaciones de sistemas de comunicación fijos o móviles convencionales. Por tanto, se hace indispensable contar con soluciones que den respuesta a estos escenarios,

basándose en los esquemas de comunicación de baja potencia, largo alcance y bajo costo planteados en Internet de las Cosas.

Si bien el presente trabajo se implementará en una solución casera, motivará a la comprensión de los principales detalles de la arquitectura de un sistema IoT y servirá como una base para abordar la implementación de sistemas similares a una escala mayor.

1.2.Planteamiento del trabajo

En la actualidad la monitorización y control de los parámetros ambientales en los sistemas de invernadero de pequeños y medianos agricultores en el Ecuador es aún bastante incipiente, debido al bajo grado de madurez digital del sector agrícola y al desconocimiento de soluciones técnicas de bajo costo, lo que ha llevado a los agricultores a prescindir de técnicas automatizadas de gestión agrícola. Sumado a esto, la ubicación geográfica de los sistemas de invernadero ha dificultado la capacidad de monitorización remota dado a que no se cuentan con alternativas de comunicación para la transmisión de los datos a plataformas centralizadas en internet, por lo que no se aprovechan los beneficios de contar con sistemas que permitan la gestión autónoma y remota de los cultivos.

Dada la problemática expuesta, el presente trabajo contempla el diseño e implementación de un prototipo que permita medir y registrar las magnitudes físicas principales en el cultivo del tomate riñón a través de sensores, con el fin de realizar un control automático del riego en base a dispositivos actuadores, todo esto orquestado a nivel lógico mediante el uso de microcontroladores. Posteriormente el sistema se encargará del envío periódico de los datos obtenidos usando esquemas de transmisión de baja potencia, largo alcance y bajo costo, que permitirán la ingesta de datos en una plataforma de internet en la nube (Cloud Computing) y la visualización de los mismos en gráficas intuitivas que faciliten la comprensión de la información de los cultivos al usuario final. El prototipo se implementará en un invernadero casero que permitirá evaluar a baja escala el funcionamiento de la arquitectura y el dispositivo IoT con el que se dará una solución al reto planteado y servirá como base para estudios futuros e implementaciones a nivel macro.

Se abordará cada apartado con el detalle suficiente para que este trabajo sirva como una guía de partida para réplicas del prototipo o mejoras en el mismo.

1.3. Estructura de capítulos

El presente trabajo queda conformado por la siguiente estructura de capítulos que se describen a continuación:

- **Contexto y estado del arte.**

Este capítulo describe los conceptos básicos de los sistemas de invernadero utilizados para el cultivo de tomate riñón, con el fin de conocer los aspectos esenciales que se deben tomar en cuenta en el diseño de un sistema de monitoreo para este tipo de cultivos. Seguidamente se revisarán las condiciones ambientales ideales bajo las cuales los cultivos de tomate riñón pueden desarrollarse de forma óptima lo que permitirá definir los criterios de partida en el desarrollo de la solución planteada, además se contextualizará las necesidades del proyecto en el ámbito del Internet de las Cosas, en términos de las tecnologías que contribuirán a la solución necesaria. Finalmente se mencionan brevemente los trabajos similares que se han desarrollado en los últimos años y las conclusiones de este capítulo.

- **Descripción general de la contribución del TFM.**

Este capítulo describe los objetivos del presente trabajo, tanto el general como los específicos, los cuales están enfocados a entregar un prototipo funcional de arquitectura y dispositivo IoT que pueda ser puesto en marcha por el público en general aplicando conceptos básicos de programación, electrónica, informática, microcontroladores e IoT. Se expondrá de forma breve la metodología usada en el desarrollo del trabajo y los pasos detallados para llevarlo a cabo de forma exitosa.

- **Desarrollo de la solución para monitorización y control de un sistema de invernadero casero.**

Este capítulo contempla la especificación de todo lo que se necesita para la puesta en funcionamiento del prototipo, describiendo la arquitectura del sistema, los elementos de dicha arquitectura y los componentes electrónicos utilizados en cada elemento. Adicionalmente se detalla a nivel de programación, la lógica implementada en los sensores y actuadores, las rutinas para transmisión y recepción de datos usando comunicaciones de baja potencia, largo alcance y bajo costo, así como también los detalles de la ingesta de datos y visualización en plataformas en la nube a través de internet. Finalmente se presentan los resultados de la implementación realizada en base al uso de los esquemas de visualización

llevados a cabo en la solución en un período de funcionamiento. A manera de referencia y complementando este capítulo se mostrará el detalle de costos e inversión del prototipo desarrollado.

- **Conclusiones y trabajos futuros de la contribución**

Este capítulo recogerá a manera de resumen todas las contribuciones que el presente trabajo aportará en la solución de la problemática abordada y en el alcance de los objetivos generales y específicos planteados.

Finalmente se plantearán una serie de casos de aplicación del proyecto en trabajos futuros, mostrando las oportunidades de mejora del mismo, las ventajas y desventajas y las posibles líneas de investigación que pueden explorarse en base a los datos recabados.

2. Contexto y estado del arte

2.1. Conceptos Básicos y Problemática

Dadas las condiciones de demanda de los cultivos de tomate riñón en términos de producción, diversidad y calidad, se ha impulsado la necesidad de incorporar tecnologías que faciliten el control y la automatización en todas las fases de los procesos productivos de dichos cultivos.

La modernización de la agricultura cada vez está llevando a que se adopten normas y regulaciones que tienen como fin estandarizar los procesos productivos de cultivo en función de indicadores de calidad e impacto ambiental, por lo que se ha abierto un campo de aplicabilidad enorme para la adopción de las tecnologías adecuadas que permitan facilitar el cumplimiento a las normativas establecidas.

De esta manera es como se plantea la opción del uso de sistemas de invernadero con el fin de asegurar que se puedan cumplir los retos antes planteados en el sector agrícola (Vega, 2017), por tanto se establecen a continuación los siguientes conceptos básicos:

2.1.1. Sistemas de Invernadero

Los sistemas de invernadero son estructuras cerradas de tamaño variado que se encuentran recubiertas por materiales transparentes que permiten proteger a los cultivos que albergan, de condiciones climáticas externas.

Su funcionamiento está basado en el conocido efecto de invernadero que ejerce el planeta tierra a través de la atmósfera sobre las radiaciones de onda corta provenientes del sol. Este principio posibilita que las radiaciones solares crucen la atmósfera terrestre, sean absorbidas por los elementos vivos e inertes del planeta y se dé un proceso de transformación de radiación solar en energía calorífica que a través de fenómenos físicos como la radiación, conducción, convección y reflexión generan radiaciones de onda larga que no pueden escapar de la atmósfera (Serrano-Cermeño, Z., 2005).

Análogamente, y tal como trabaja el principio descrito anteriormente, los sistemas de invernadero dedicados a los cultivos tratan de emular este funcionamiento. Las cubiertas transparentes actúan como la atmósfera terrestre, dejan pasar la radiación solar, la misma calienta el suelo y los cultivos, los cuales generan radiaciones de onda larga que son retenidas en el sistema lo que propicia a la creación de condiciones climáticas específicas o microclimas

que son independientes del clima externo. Esta característica posibilita la creación de parámetros ambientales ideales para cualquier tipo de cultivo, así como también, aporta la capacidad de poder producir un cultivo en todas las estaciones del año o en lugares donde se tienen condiciones climáticas no propicias.

2.1.1.1. Uso de Sistemas de Invernadero en Cultivos de Tomate

El tomate riñón, tomate o jitomate es una hortaliza perteneciente a la Familia Solanaceae, Género Solanum y Especie Lycopersicum, comúnmente conocida como Solanum Lycopersicum de acuerdo a su descripción taxonómica (López-Marín, 2016).

En el Ecuador esta hortaliza es una de las más consumidas, cultivadas y demandadas debido a sus aportes nutricionales, así como también por sus innumerables usos gastronómicos. Debido a sus condiciones físicas puede ser cultivada al aire libre en campos ubicados a nivel del mar hasta una altura máxima de 3200 msnm², por lo que los cultivos pueden desplegarse en regiones tórridas, valles e incluso en regiones andinas a través del uso de sistemas de invernadero, en donde toma una importancia destacada el hecho de implementar mecanismos que permitan controlar las variables climáticas para mejorar los procesos inherentes a la producción del tomate.

Es importante mencionar que el despliegue de invernaderos para cultivo de tomate se está convirtiendo en una actividad cada vez más popular entre los pequeños y medianos agricultores que contribuye al desarrollo económico de las familias campesinas y aseguran el abastecimiento local del producto en el mercado (Asociación de Agrónomos Indígenas de Cañar, 2003).

2.1.1.2. Parámetro Ambientales en el Cultivo de Tomate

Las variables climáticas fundamentales que rigen la producción en los sectores agrícolas basados en sistemas de invernadero son la temperatura, humedad, luminosidad y concentración de CO₂ (Serrano-Cermeño, Z., 2005). El mayor control que se tenga sobre los parámetros antes mencionados garantizará el éxito y la seguridad en las labores productivas que se lleven a cabo.

² msnm: metros sobre el nivel del mar.

El cultivo de cada producto agrícola tiene sus particularidades y afectación en términos de las variables climáticas anteriormente descritas, es así que resulta de especial interés conocer las especificaciones que rigen al cultivo de tomate, dado a que nos servirá como punto de partida en la implementación de un sistema de control y monitoreo de dichas variables. Es así que las mismas se describen a continuación.

2.1.1.2.1. Temperatura

La temperatura dentro del invernadero es una de las variables claves dentro de un sistema de medición y control ambiental debido a que tiene incidencia directa en el desarrollo adecuado de las plantas dado a que facilitan la realización de los procesos de fotosíntesis. Es así que el calor favorece en la capacidad de las plantas en la ingesta de nutrientes y agua del suelo, mientras que a bajas temperaturas ocurre todo lo contrario.

La temperatura ideal para el desarrollo de las plantas de tomate riñón se encuentra en el rango de 18° a 25°C (Asociación de Agrónomos Indígenas de Cañar, 2003).

2.1.1.2.2. Humedad

Las oscilaciones higrométricas dentro de una infraestructura de invernadero pueden ser bastante frecuente por lo que es fundamental monitorearla y controlarla debido a que tiene influencia directa en la aparición y desarrollo de plagas, así como también generan alteraciones en la absorción de agua y nutrientes que desencadenan alteraciones fisiológicas sobre las plantas.

El rango de humedad ideal para cultivos de tomate oscila entre 50% y 70% (Asociación de Agrónomos Indígenas de Cañar, 2003)

2.1.1.2.3. Concentración de CO₂

El dióxido de carbono CO₂ es un elemento fundamental que contribuye a la realización del proceso de fotosíntesis de las plantas, por tanto, su monitoreo es fundamental para garantizar un desarrollo óptimo del cultivo.

El rango de concentración de dióxido de carbono CO₂ ideal para el manejo de cultivo de tomate oscila entre 1000 y 2000 ppm³ (Serrano-Cermeño, Z., 2005)

³ ppm: Partes por millón

2.1.1.2.4. Luminosidad

La luz es la materia principal que se recibe del sol y que tiene incidencia sobre el desarrollo de los tejidos de la planta, la floración y la adecuada conformación de los frutos.

Los rangos ideales de luminosidad para el cultivo de tomate se encuentran entre los 10.000 a 40.000 lux. (Serrano-Cermeño, Z., 2005).

Dada la escala en la cual se va a implementar el presente trabajo, va a resultar de particular interés el monitoreo y control de las variables de temperatura y humedad, sin embargo, se va a monitorear los valores de luminosidad y concentración de CO₂ con el fin de contar con datos informativos de las variaciones de estos parámetros en función del tiempo de observación.

2.1.2. Problemática

Actualmente los niveles de automatización en las implementaciones de invernadero a pequeña y mediana escala en el Ecuador son aún bastante escasas, debido a la poca penetración tecnológica que se tiene en las zonas donde típicamente se realizan los cultivos, razón por la cual aún se siguen aplicando técnicas manuales de control y monitoreo que no aportan una solución efectiva a las demandas de producción y calidad establecidas acorde a la evolución tecnológica actual. Además, las contadas implementaciones tecnológicas en sistemas de invernadero a pequeña y mediana escala aportan sistemas de monitoreo y control netamente de forma local, es decir, no disponen de medios de comunicación de la información que permitan adquisición de datos de forma local y transmisión de datos hacia plataformas remotas para su posterior procesamiento y visualización, esto debido a los limitantes de conectividad que presentan las zonas geográficas remotas donde usualmente se ubican los cultivos.

De esta manera surge el planteamiento del presente proyecto que pretende implementar un prototipo de dispositivo IoT de bajo costo para la adquisición de datos de temperatura, humedad, concentración de CO₂ y luminosidad dentro de sistemas de invernadero, la transmisión de dichos datos usando un esquema que permita alcanzar zonas de cobertura largas con consumo de potencia mínimo y libres de pago de licencias, y la posterior ingesta de datos a plataformas Cloud que permitan la visualización remota de los resultados obtenidos.

2.2. Proyectos relacionados con el tema del TFE

En este apartado se incluyen trabajos similares al descrito en este proyecto, cuya temática se centra en los sistemas de invernadero para cultivos de tomate y en el diseño de sistemas de control digital. A continuación, se describen las similitudes y diferencias de los mismos con el presente trabajo.

2.2.1. Tesis de Pregrado

- “Evaluación y selección de cultivares híbridos de tomate [*Solanum lycopersicum* L. (MILL.)] en la zona de Puerto la Boca, Manabí” (Cevallos Gutiérrez, K. J., 2018).
- “Evaluación agronómica del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) bajo tres diferentes coberturas plásticas” (Jaramillo-Andrade, J. F., 2015).
- “Diseño e implementación de un dispositivo digital para el control de temperatura en un invernadero de tomate” (Baltazar-Aguilar, J. et al., 2014).
- “Diseño e implementación de un prototipo de sistema de control, supervisión de temperatura y humedad, para cultivos caseros bajo invernadero, utilizando el módulo Arduino, en la ciudad de Cayambe” (Caiza-Chimarro, J. C., 2016).
- “Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores con tecnología LoRa para monitoreo industrial orientado a OPC de arquitectura unificada” (Heredia-Rivadeneira, A. E. & Lucero-Andrade, P. F., 2021).

Los trabajos antes descritos en su mayoría abarcan temáticas que se centran en la gestión de cultivos de tomate vistos desde una perspectiva agropecuaria profundizando en temas referentes al cultivo y sus variables óptimas, pero sin enfoque hacia el internet de las cosas.

Las tesis presentadas por (Baltazar-Aguilar, J. et al., 2014) y (Caiza-Chimarro, J. C., 2016) presentan un enfoque de control de temperatura/humedad en invernaderos a gran escala, sin embargo, se orientan a sistemas de control local donde no existen arquitecturas de comunicación de datos con aplicación de técnicas IoT.

Finalmente la tesis presentada por (Heredia-Rivadeneira, A. E. & Lucero-Andrade, P. F., 2021), introduce temática IoT reflejada en la implementación de sistemas de transmisión de baja

potencia y larga cobertura LPWAN⁴, sin embargo, su enfoque está orientado al monitoreo industrial y no en aplicaciones de agricultura.

2.3. Tecnologías relacionadas con el tema del TFE

Con el fin de dar solución a la problemática anteriormente expuesta el presente trabajo considera la inclusión de las siguientes tecnologías:

2.3.1. Microcontroladores

Con el fin de implementar las lógicas de monitoreo y control en el presente proyecto, se ha visto la necesidad de incluir microcontroladores que permitan la gestión de las medidas provistas por los sensores de temperatura, humedad, concentración de CO₂ y luminosidad.

De toda la gama de microcontroladores existente en el mercado se ha optado por trabajar con los microcontroladores M5GO del fabricante M5stack, los mismos que se encuentran basados en el módulo ESP32 de Espressif Systems, que son una familia de chips SoC⁵ de bajo costo y poco consumo energético, cuyas características técnicas se pueden apreciar a continuación:

Figura 1. Microcontrolador M5GO



Fuente: M5Stack, 2021b

⁴ LPWAN: Low Power Wide Area Network (Red de área amplia de baja potencia).

⁵ SoC: System on Chip.

Tabla 1. Especificaciones Técnicas microcontrolador M5GO.

Ítem	Parámetros
ESP32-D0WDQ6-V3	240MHz dual core, 600 DMIPS, 520KB SRAM, Wi-Fi
Flash	16MB
Input Voltage	5V @ 500mA
Host Interface	TypeC x1, POGO PIN x1, I2C x1, GPIO x1, UART x1
IPS Screen	2 inch, 320x240 Colorful TFT LCD, ILI9342C, 853nit max brightness
Keys	Custom Keys x 3
Speaker	1W-0928
Microphone	Analog BSE3729 Microphone
IMU	6-axis MPU6886
USB Chip	CH9102F
LED	SK6812 RGB LED x 10
Antenna	2.4G 3D antenna
Battery	500 mAh @ 3.7V
Operating Temperature	0°C to 40°C

Fuente: Adaptada de M5Stack, 2021b

Como puede apreciarse el microcontrolador está provisto de 3 puertos Grove (4 pines), denominados Puerto A, B y C, para la conexión de sensores/actuadores y módulos de comunicación. Permite conexión Wi-Fi y alimentación por medio de batería. Asimismo, permite la visualización de datos locales a través de un panel LCD, que para fines didácticos y educativos se usará para mostrar la medición de variables. Un aspecto a destacar es que el

microcontrolador puede ser programado a través del ambiente de desarrollo de Arduino o usando el lenguaje microPython implementado por UIFlow mediante diagramas de bloque.

2.3.2. Sensores y Actuadores

Con el fin de medir y controlar las magnitudes físicas que intervienen en los sistemas de invernadero se hizo necesaria la inclusión de los siguientes sensores y actuadores:

2.3.2.1. Sensor de Temperatura, Humedad y Presión

La unidad ENV. III Unit con puerto grove de 4 pines está compuesta por los sensores SHT30 y QPM6988 que permiten capturar mediciones de temperatura, humedad y presión del ambiente a través de la interfaz serial I2C.

Figura 2. Sensor de Temperatura, Humedad y Presión (ENV. III)



Fuente: *ENV III Unit with Temperature Humidity Air Pressure Sensor (SHT30+QMP6988)*,

2021

Tabla 2. Especificaciones Técnicas Unidad ENV. III

Ítem	Parámetros
Maximum temperature measurement range	-40 ~ 120 °C
Highest measurement accuracy	0 ~ 60 °C/±0.2°C
Humidity measurement range/error	10 ~ 90 %RH / ±2%

Ítem	Parámetros
Maximum measured value of air pressure/resolution/error	300 ~ 1100hPa / 0.06Pa / ±3.9Pa
Communication protocol	I2C: SHT30(0x44), QMP6988(0x70)
Working temperature	32°F to 104°F (0°C to 40°C)

Fuente: Adaptada de *ENV III Unit with Temperature Humidity Air Pressure Sensor (SHT30+QMP6988)*, 2021

2.3.2.2. Sensor de concentración de CO₂

La unidad TVOC/eCO₂ con puerto grove de 4 pines está compuesta por el sensor SGP30 y permite capturar mediciones de concentración de CO₂ a través de la interfaz serial I2C.

Figura 3. Unidad TVOC/eCO₂



Fuente: *TVOC/eCO₂ Gas Sensor Unit (SGP30)*, 2021

Tabla 3. Especificaciones Técnicas Unidad TVOC/eCO₂

Ítem	Parámetros
Measurement range	Ethanol:0-1000ppm,H2:0-1000ppm,TVOC:0-60000 ppb,eCO ₂ :400-60000 ppm
TVOC/eCO ₂ Sampling rate	1Hz

Ítem	Parámetros
TVOC/eCO2 Resolution	TVOC:1/6/32bbp,eCO2:1/3/9/31ppm
Communication protocol	I2C:0x58

Fuente: Adaptada de *TVOC/eCO2 Gas Sensor Unit (SGP30)*, 2021

2.3.2.3. Sensor de Luminosidad

La unidad Dlight con puerto grove de 4 pines está compuesta por el sensor BH1750FVI y permite capturar mediciones de luminosidad a través de la interfaz serial I2C.

Figura 4. Unidad Dlight



Fuente: *Dlight Unit - Ambient Light Sensor (BH1750FVI-TR)*, 2021

Tabla 4. Especificaciones Técnicas Unidad Dlight

Ítem	Parámetros
Sensor Model	BH1750FVI
Illumination detection range	1-65535 lx
Communication interface	I2C communication interface (addr: 0x23)
Typical peak sensitivity wavelength	560nm

Ítem	Parámetros
Working current	< 5V@143uA
AD conversion depth	16bit

Fuente: Adaptada de *Dlight Unit - Ambient Light Sensor (BH1750FVI-TR)*, 2021

2.3.2.4. Bomba de Agua

La unidad Watering con puerto grove de 4 pines está compuesta por una bomba de agua que permite accionarse de acuerdo a las mediciones de humedad realizadas, permitiendo el control de riego del cultivo.

Figura 5. Unidad Watering



Fuente: M5Stack, 2021c

Tabla 5. Especificaciones Técnicas Unidad Watering

Ítem	Parámetros
Pump power	5W
Net Weight	78g
Gross Weight	103g

Fuente: Adaptada de M5Stack, 2021c

Los sensores y actuadores antes descritos permitirán obtener las variables relevantes del sistema de invernadero y hacer un control básico del riego, todo esto orquestado por el microcontrolador.

2.3.3. Comunicación de Datos

2.3.3.1. Comunicaciones de Baja Potencia

Dado que el desarrollo del presente trabajo involucra dar solución a la problemática de las comunicaciones en zonas remotas donde no se tienen redes de comunicación fijas o móviles convencionales, se ha visto la opción del uso de comunicaciones de bajo consumo de potencia y largo alcance conocidas en el ámbito IoT como LPWAN (Low Power Wide Area Network).

Como su nombre lo indica las redes LPWAN son redes que se caracterizan por su gran cobertura en términos de distancia, bajo consumo de potencia y bajo throughput de datos (Gehlot et al., 2020), lo que las vuelven idóneas para aplicaciones de agricultura.

De las diversas tecnologías desarrolladas en este campo tales como SigFox, LoRa, NB-IoT y LTE-M, que son las más representativas, se ha optado por implementar LoRa como tecnología para la transmisión de datos entre los sensores del invernadero y el gateway de conexión con las plataformas Cloud. Entre las ventajas encontradas en el uso de esta tecnología se encuentran el bajo costo, la amplia cobertura, el bajo consumo energético y la capacidad de escalabilidad futura ofreciendo la posibilidad de integrar varios dispositivos LoRa hacia un solo gateway.

LoRa es una técnica de modulación de espectro ensanchado que tiene su origen de la modulación chirp CSS⁶, en la cual el mensaje a transmitir se modula en frecuencia. Este esquema de modulación se implementa sobre las bandas de frecuencia industriales, científicas y médicas ISM⁷ de 433, 868 y 915 MHz. Dada la definición de bandas ISM en el Ecuador, en el presente desarrollo se utilizará un módulo LoRa en la frecuencia 868 MHz con rango de operación de hasta 915 MHz, el cual se describe a continuación:

⁶ CSS: Chirp Spread Spectrum

⁷ ISM: Industrial, Scientific and Medical

Figura 6. Módulo Lora 868 MHz

Fuente: M5Stack, 2021a

Tabla 6. Especificaciones Técnicas Módulo LoRa 868 MHz

Especificaciones	Parámetros
Módulo LoRa	Ra-01H
Protocolo de Comunicación	SPI
Frecuencia de Operación	803-930 MHz
Modulaciones Soportadas	FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa™ and OOK modulation modes
Sensibilidad de Recepción	Hasta -141 dBm

Fuente: Adaptada de M5Stack, 2021a

2.3.3.2. Protocolo de Comunicación Machine to Machine (M2M)

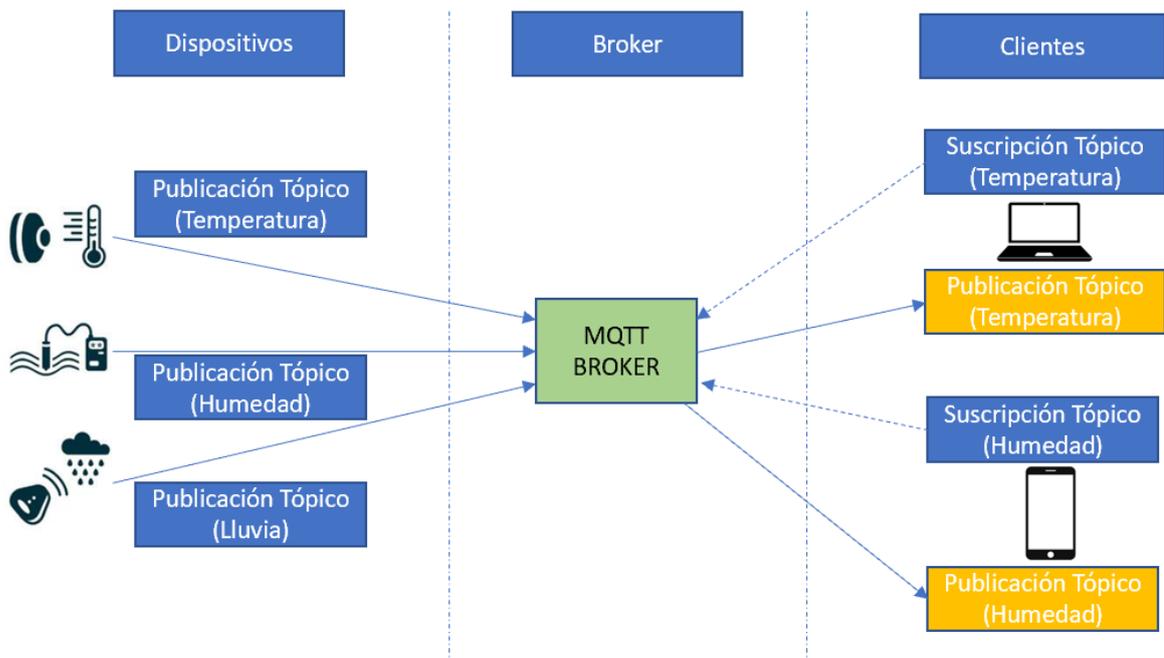
Con el fin de abordar la solución de conectividad desde un dispositivo IoT o gateway hacia una plataforma de Cloud Computing en Internet, se ha optado por elegir el protocolo MQTT (Message Queing Telemetry Transport). MQTT es un protocolo de comunicación M2M (Machine to Machine) muy utilizado en el ámbito de Internet de las Cosas por su diseño ligero que permite la comunicación de datos por canales de ancho de banda limitados (Hillar, 2017).

Este protocolo está basado en un servidor broker que se encarga de gestionar mecanismos de publicación y suscripción de temas o tópicos de datos entre los diferentes clientes de la red,

usando para esto el stack de protocolos TCP (Transmission Control Protocol) / IP (Internet Protocol) que son la base actual de la transmisión de datos en Internet.

Esquemáticamente el funcionamiento de este protocolo puede visualizarse de mejor manera en la siguiente figura:

Figura 7. Esquema del protocolo MQTT



Fuente: Elaboración propia

Debido a su arquitectura, ligereza, simplicidad y su funcionamiento independiente entre clientes, este protocolo se ha vuelto clave en el desarrollo de IoT sobre todo en ambientes de conectividad con limitados recursos de transmisión, como es el planteado en el presente trabajo.

2.3.4. Cloud Computing

El Cloud Computing o computación en la nube es otra de las tecnologías que han impulsado el desarrollo de IoT en los últimos años. Este paradigma tecnológico puede definirse como un modelo que posibilita el acceso a servicios informáticos bajo demanda a través de una red de comunicaciones. Este modelo se basa en la escalabilidad, disponibilidad, flexibilidad e inmediatez de los recursos informáticos con el fin de prestar servicios de procesamiento de datos, almacenamiento y capacidad de cómputo a sistemas que pueden ser parte de soluciones tecnológicas (Beltrán-Pardo, M. & Sevillano-Jaén, F., 2013).

En la actualidad la oferta de servicios de cloud computing es muy variada y diversa. La elección de una u otra opción dependerá de muchos factores entre los que podemos citar: Seguridad, Servicios, Disponibilidad, Redundancia, Rapidez de Implementación, Complejidad y Costos.

Para el desarrollo del presente trabajo se ha optado por elegir a la plataforma de Cloud Computing Amazon Web Services (AWS) como parte integrante de la solución debido a que cumple con los requisitos de seguridad, complejidad, servicios y costos que se adaptan a las necesidades del proyecto.

AWS es una plataforma de cloud computing de nube pública que consta de una gama de servicios informáticos especializados para múltiples aplicaciones. Para la implementación que se llevará a cabo en el presente trabajo se hará uso de dos módulos de AWS: AWS IoT Analytics y AWS Quicksight.

AWS IoT Analytics, es un servicio que permite el análisis de datos provenientes de dispositivos IoT, realizando previamente sobre los mismos etapas de filtrado, transformación y enriquecimiento, para posteriormente generar conjuntos de datos de series temporales que facilitan su posterior análisis.

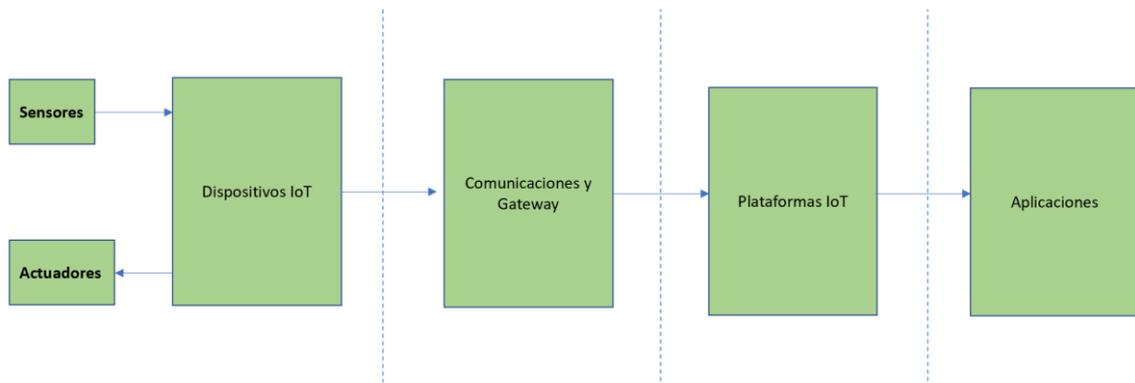
AWS Quicksight, por su parte, es un servicio de visualización de datos compatible con diferentes fuentes de origen, que posibilita la generación de dashboards de información con el fin de que los usuarios finales tengan una comprensión clara de las relaciones existentes entre las variables de un sistema y tomar la mejores decisiones respecto al mismo.

La unión de los módulos antes citados permitirán abordar el proyecto planteado y dar solución a la ingesta de datos y visualización de los datos del sistema de invernadero desarrollado.

2.3.5. Internet de las cosas (IoT)

La tecnología de Internet de las Cosas o IoT se basa en la construcción de redes donde objetos físicos de diversa índole están conectados a internet haciendo uso de dispositivos de red, con el fin de intercambiar datos de manera autónoma. Partiendo de esta aproximación podemos utilizar la siguiente arquitectura de referencia como base para el diseño del presente proyecto:

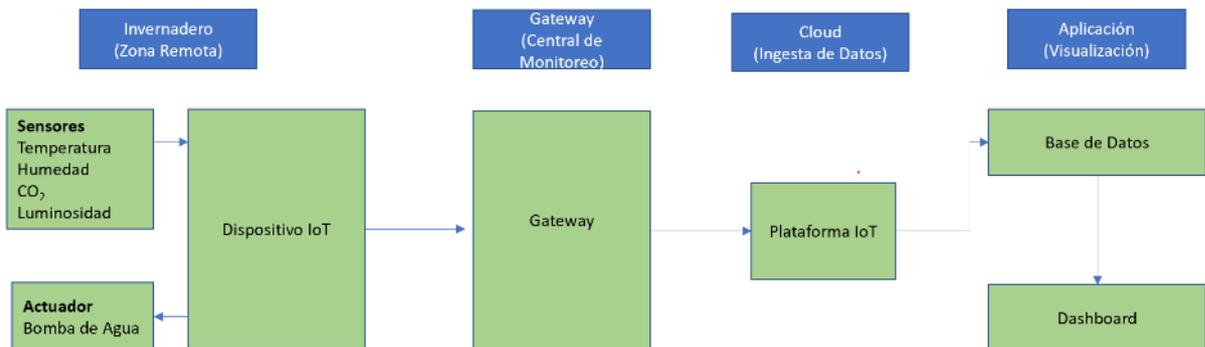
Figura 8. Arquitectura de Referencia IoT



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la base anteriormente citada y aterrizando la arquitectura de referencia a la solución y tecnologías descritas en los anteriores apartados, podemos estructurar el diseño planteado de la siguiente manera:

Figura 9. Arquitectura de referencia del presente trabajo



Fuente: Elaboración Propia

Como se puede apreciar en la Figura 9, el esquema que se utilizará para el diseño de arquitectura del presente trabajo contempla el uso de un dispositivo IoT del lado del invernadero que será encargado de adquirir las mediciones de los cultivos a través de los sensores de temperatura, humedad, CO₂ y luminosidad. También aplicará la lógica necesaria para accionar la bomba de agua en base a las mediciones de los parámetros ambientales claves. Periódicamente también será el encargado de crear una cadena de datos con las variables climáticas que será transmitida a través de LoRa 868 MHz hacia el dispositivo gateway.

El lado del gateway estará conformado por otro dispositivo IoT ubicado en la central de monitoreo, el cual será el encargado de recibir a través de LoRa la información periódica del invernadero y reenviarla usando el protocolo de publicación/suscripción MQTT hacia la plataforma Cloud Amazon Web Services (AWS) sobre una red Wi-Fi.

Del lado de la plataforma Cloud, se hará uso del servicio AWS IoT Analytics para almacenar y dar formato a las cadenas de datos provenientes del gateway. Finalmente se implementará el servicio AWS Quicksight para diseñar un dashboard que permita generar la visualización de datos adecuada acorde a los datos generados en el invernadero.

2.4. Conclusiones sobre el estado del arte

A lo largo del presente capítulo se ha descrito de manera breve los conceptos básicos de los sistemas de invernadero en cuanto a sus principios de funcionamiento y a sus variables climáticas claves. Es importante recalcar que la implementación de un sistema de control y monitoreo de cultivos de tomate es clave para obtener los mejores resultados en términos de producción y calidad, sin embargo, como se ha expuesto a lo largo del capítulo muchas veces no se aplican tales soluciones debido al desconocimiento de las tecnologías involucradas para llevar a cabo estos sistemas, los costos elevados que las mismas pueden tener y las dificultades que implica integrar este tipo de tecnologías en zonas remotas en las que no se cuentan con redes de comunicación para transmitir datos a grandes distancias.

Es así que en este apartado se describieron las tecnologías que pueden brindar una solución a la problemática planteada incorporando conceptos de IoT, proponiendo una arquitectura de referencia que permita dar solución a los siguientes aspectos claves:

- Monitorización de cultivos en el sistema de invernadero.
- Control de riego en base a la medición de las variables climáticas claves.
- Transmisión de datos a grandes distancias con el uso de LPWAN.
- Direccionamiento de datos hacia un gateway centralizado.
- Transmisión de datos por medio de protocolos M2M hacia plataformas Cloud.
- Análisis y visualización de datos usando servicios de cloud computing.

En virtud de lo expuesto, el presente trabajo propone implementar a pequeña escala un modelo funcional de solución que cubra los aspectos claves antes descritos y cuya

arquitectura sea ajustable, replicable y escalable en aplicaciones de un mayor nivel de complejidad.

3. Descripción general de la contribución del TFE

Con este proyecto se propone integrar todos los conocimientos adquiridos en el Máster de Internet de las Cosas con el fin de implementar un prototipo funcional de dispositivo y arquitectura IoT que permita la adquisición de datos de un sistema de invernadero, el control de riego en función de las variables climáticas, la transmisión de datos hacia un gateway centralizado, la ingesta de datos en una plataforma de cloud computing y finalmente la obtención de información y visualización a partir de los datos recabados.

3.1. Objetivos

A continuación, se describe el objetivo general y los objetivos específicos que se pretenden alcanzar con la realización del presente trabajo.

Objetivo general

Diseñar, implementar y especificar un prototipo a pequeña escala de arquitectura y dispositivo IoT, que permita el control y monitorización de cultivos de tomate en zonas geográficas remotas.

Objetivos específicos

Cada objetivo específico descrito a continuación forma parte integral del objetivo general, por lo que se espera su cumplimiento total a lo largo del desarrollo del presente trabajo:

- Diseñar e implementar un prototipo de dispositivo IoT sobre la base del uso de microcontroladores y sensores/actuadores para el control y monitoreo de cultivos de tomate mediante a parámetros ambientales específicos.
- Implementar un sistema de transmisión de datos basado en comunicación LoRa que permita la transmisión de datos entre el prototipo IoT y el gateway centralizado.
- Desarrollar un prototipo de gateway sobre la base de microcontroladores que permita la transmisión de datos hacia la plataforma Cloud AWS basado en el uso del protocolo MQTT.
- Crear en la plataforma AWS las políticas para la ingesta de datos provenientes del gateway y su almacenamiento en el módulo AWS IoT Analytics.
- Desplegar un dashboard de visualización de datos que permita recabar información de los cultivos usando el módulo AWS Quicksight.

3.2. Metodología del trabajo

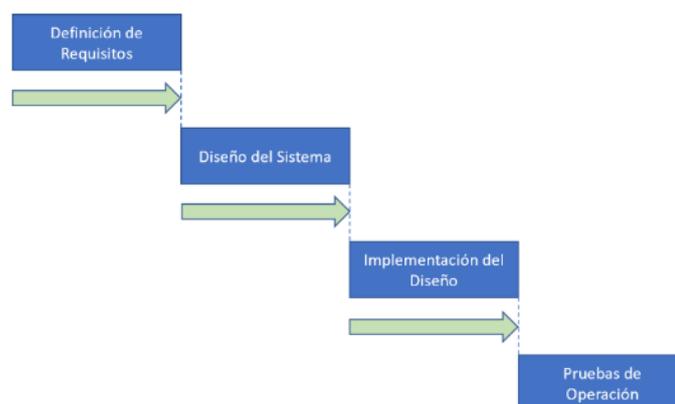
Basados en el esquema de arquitectura del presente trabajo, expuesto en la Figura 9, podemos distinguir claramente las siguientes fases en la elaboración del proyecto, las cuales podemos describir a continuación:

- Fase 1: Desarrollo del Sistema de Monitoreo y Control del Cultivo.
- Fase 2: Desarrollo del Gateway de Comunicación.
- Fase 3: Ingesta de datos desde el Gateway hacia la plataforma de Cloud Computing.
- Fase 4: Desarrollo del sistema de visualización de datos.

Con el fin de dar cumplimiento al objetivo general y los objetivos específicos planteados en el numeral 3.1 se ha elegido la metodología tradicional, secuencial o en cascada como método base para gestionar la ejecución del proyecto, debido a que el presente trabajo puede dividirse en fases que se van ejecutando linealmente, y cada fase superior depende de la ejecución de la fase anterior, por tanto esta metodología se adapta al tipo de trabajo propuesto, en el cual se plantean unos requisitos específicos bien conocidos y dado que el ambiente de desarrollo y su despliegue son altamente controlados nos facilitará la gestión de toda la solución.

De acuerdo a la metodología usada en el presente trabajo, en cada fase de la implementación del mismo se aplicarán las siguientes etapas de gestión del proyecto, desde la perspectiva de la metodología secuencial, la cual puede ser sintetizada en la Figura 10 mostrada a continuación:

Figura 10. Fases de gestión de proyectos basado en la metodología secuencial



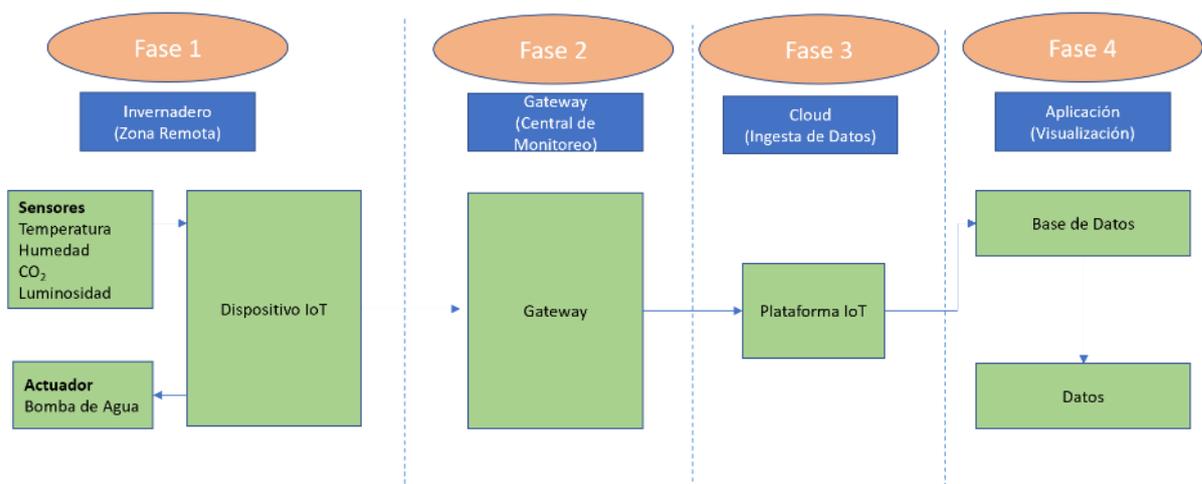
Fuente: Elaboración propia

La aplicación de la metodología antes descrita nos permitirá facilitar la implementación del sistema propuesto debido a que en casa fase de desarrollo se levantarán los requisitos necesarios que permitirán diseñar sistemas físicos y lógicos que posibiliten la implementación y ejecución de pruebas. Por tanto, será un método que nos brinde una gestión simple del proyecto, un conocimiento del avance real del mismo y un ahorro en recursos en términos de tiempo y costos.

3.3.Descripción general de las partes o componentes de la propuesta

Tal y como se ha revisado en apartados anteriores la solución propuesta a la problemática planteada en el presente trabajo estará basada en la consecución de las siguientes fases de desarrollo que se pueden visualizar en la Figura 11.

Figura 11. División en fases de la solución propuesta



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describirá brevemente los componentes de la propuesta:

Fase 1: Desarrollo del Sistema de Monitoreo del Cultivo.

Esta fase consistirá en el diseño e implementación de un Dispositivo IoT que permita medir periódicamente los parámetros de temperatura, humedad, dióxido de carbono (CO₂) y luminosidad de un cultivo, a través de la conexión a sensores que capturen dichas medidas y las desplieguen en una pantalla LCD con fines informativos.

Asimismo, esta fase contempla el análisis de los valores obtenidos en los parámetros ambientales anteriormente descritos, comparándolos con valores umbrales que permitirán tomar acción sobre el riego del cultivo a través de un actuador que dispare dicho proceso.

Finalmente, esta fase incluirá un proceso que permitirá capturar los datos periódicos obtenidos de los sensores, organizarlos y empaquetarlos en una cadena de texto que serán transmitidos por medio de tecnología LoRa hacia el dispositivo gateway de la fase 2, el cual se describe en los posteriores apartados.

Fase 2: Desarrollo del Gateway de Comunicación.

Esta fase consistirá en el diseño e implementación de un Dispositivo IoT que permita recibir a través de LoRa las tramas de información provenientes del Dispositivo IoT de monitoreo de la fase 1, organizar dichos datos para que se presenten de manera amigable y didáctica en un display LCD y se encargará de gestionar la conexión Wi-Fi del dispositivo con el fin de que sea el método de conexión primario por donde dicho dispositivo envíe los datos hacia la plataforma de cloud computing AWS.

Finalmente, esta fase incluirá un proceso que realice el manejo de los datos recibidos y los envíe periódicamente a través del protocolo MQTT hacia la plataforma AWS.

Fase 3: Ingesta de datos desde el Gateway hacia la plataforma de Cloud Computing.

Esta fase consistirá en la configuración de la plataforma de cloud computing AWS, concretamente el módulo AWS IoT Core, con el fin de posibilitar la conexión del dispositivo IoT de la fase 2 del proyecto (gateway) a través de la configuración de un nuevo objeto dentro de la plataforma, la obtención de las llaves de autenticación del dispositivo con la plataforma AWS y la creación de las políticas que permitan conceder acceso a los recursos de la plataforma con el objeto de aceptar las publicaciones de temas (datos) provenientes del gateway.

Fase 4: Desarrollo del sistema de visualización de datos.

Esta fase contempla el diseño de un sistema de visualización de datos que brinde información periódica de los cultivos a los usuarios interesados, a través de acceso Web o aplicaciones móviles de manera remota, a fin de tener datos de primera mano inherentes a las variables ambientales. Para esto se usará el módulo AWS IoT Analytics creando las reglas necesarias para redireccionar los datos provenientes del gateway que ingresan por AWS IoT Core y

organizando esta información en una base de datos relacional que facilite la realización de consultas y permitan una gestión adecuada de la información.

Finalmente, esta fase contemplará el uso del módulo AWS Quicksight como herramienta para visualizar de forma gráfica la información de los cultivos y se basará en la creación de un dashboard de series temporales que permita observar la variación temporal de las variables ambientales y su almacenamiento para el manejo de históricos que a futuro podrán permitir generar conocimiento acerca de patrones de comportamiento en los cultivos.

Alcance y limitaciones

El alcance del presente trabajo se centra en el diseño e implementación de un prototipo de arquitectura y dispositivo IoT, que permita el control y monitorización de cultivos de tomate para zonas geográficas remotas basado en sistema de comunicación LoRa. Con el fin de llevar a cabo el proyecto, el mismo se basará en la integración de los siguientes componentes:

- Sistema de Monitoreo y Control del Cultivo.
- Gateway de Comunicación.
- Ingesta de datos desde el Gateway hacia la plataforma de Cloud Computing.
- Sistema de visualización de datos.

Cabe mencionar que la implementación es a pequeña escala en un ambiente controlado y no contará con aplicaciones en sistemas de invernadero industriales, sin embargo, permitirá dar solución a la problemática planteada y se espera que conceptualmente brinde una guía para la implementación de soluciones de mayor complejidad.

Tecnologías implicadas

Con el fin de cumplir los objetivos planteados el presente trabajo contempla la inclusión de las siguientes tecnologías para su desarrollo:

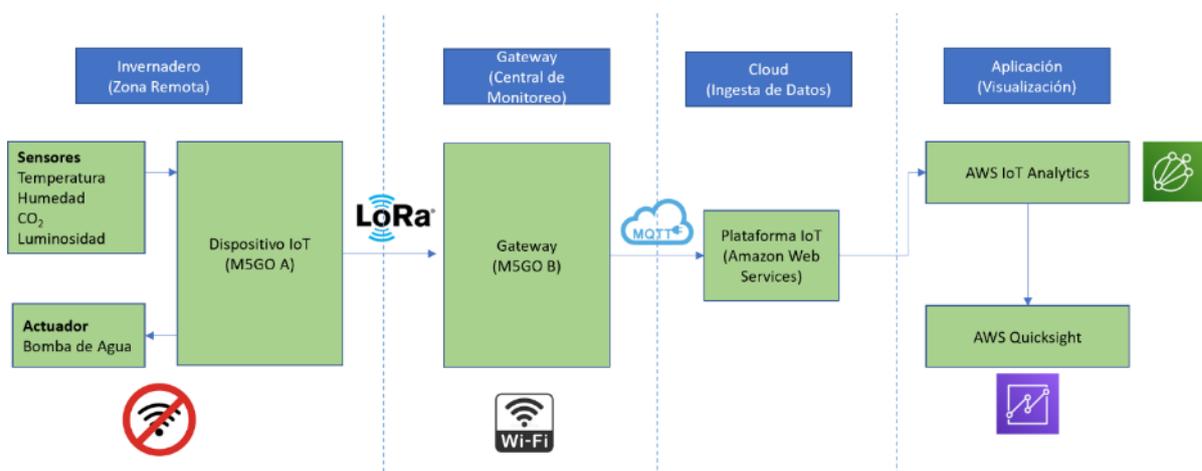
- Sistema de Monitoreo y Control del Cultivo: Para llevar a cabo este componente, se hará uso de microcontroladores basados en ESP32 en conjunto con sensores de temperatura, humedad, CO₂ y luminosidad, también se incluirá un actuador para tomar acción de una bomba de agua para el sistema de riego. Para la transmisión de datos se empleará módulos de comunicación LoRa operando en la frecuencia de 915 MHz.

- **Gateway de Comunicación:** Este componente estará basado en un módulo de comunicación Lora en la frecuencia de 915 MHz, quien recibirá datos provenientes del dispositivo de monitoreo y a través de comunicación Wi-Fi será responsable de enviar periódicamente dichos datos hacia la plataforma AWS usando para esto el protocolo MQTT.
- **Ingesta de datos desde el Gateway hacia la plataforma de Cloud Computing:** Este componente se encuentra formado por la plataforma de cloud computing Amazon Web Services y su módulo AWS IoT Core, que permitirá registrar el dispositivo gateway y recibir de manera segura los datos de monitoreo del cultivo.
- **Sistema de visualización de datos:** Este componente estará conformado por los módulos AWS IoT Analytics y AWS Quicksight, para almacenar los datos y construir dashboards de visualización de los mismos.
- **Programación:** Con el fin de implementar las lógicas de programación a nivel de software en los microcontroladores, el presente trabajo contempla el uso del ambiente de desarrollo UIFlow de M5Stack, capaz de generar código Python a través de diagramas de bloques de función.

Arquitectura, componentes e integración de tecnologías

Basado en la arquitectura base planteada en apartados anteriores, las tecnologías implementadas en el proyecto se integran de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 12:

Figura 12. Arquitectura e Integración de Tecnologías



Fuente: Elaboración propia

El esquema mostrado en la Figura 12 describe las interacciones que tienen todos los componentes del sistema y las tecnologías que se incluyen en cada componente, con el fin de visualizar de manera global la estructura del presente trabajo y facilitar la comprensión del desarrollo del mismo.

Resultados esperados

Los resultados esperados tras la ejecución del proyecto vienen dados por los siguientes puntos:

- Llevar a la práctica un sistema que pueda monitorizar y controlar cultivos usando para esto sistemas de comunicación LoRa.
- Realizar la ingesta de datos en plataformas cloud computing que posibiliten el almacenamiento y enriquecimiento de los mismos.
- Desarrollar aplicaciones de visualización de datos a través de dashboards de series temporales, que sean accesibles a través de la Web o aplicaciones de terminales móviles.

Presupuesto y retorno esperado de la inversión

Con el fin de llevar a la práctica el diseño e implementación de la solución propuesta será necesaria la adquisición de diferentes componentes electrónicos y materiales de jardinería, los mismos que brevemente se resumen a continuación:

Tabla 7. Descripción general de materiales

Tipo	Descripción
Componente Electrónico	Microcontroladores
Componente Electrónico	Sensores
Componente Electrónico	Módulos de Comunicación LoRa
Componente Electrónico	Bomba de Agua
Componente Electrónico	Cables y Conectores
Material de Jardinería	Estructura de Invernadero
Material de Jardinería	Macetas
Material de Jardinería	Plantas de Tomate
Material de Jardinería	Tierra
Material de Jardinería	Abono

Fuente: Elaboración propia

El detalle de costos y cantidades será mostrado en el apartado 4 donde se detallará el desarrollo del proyecto.

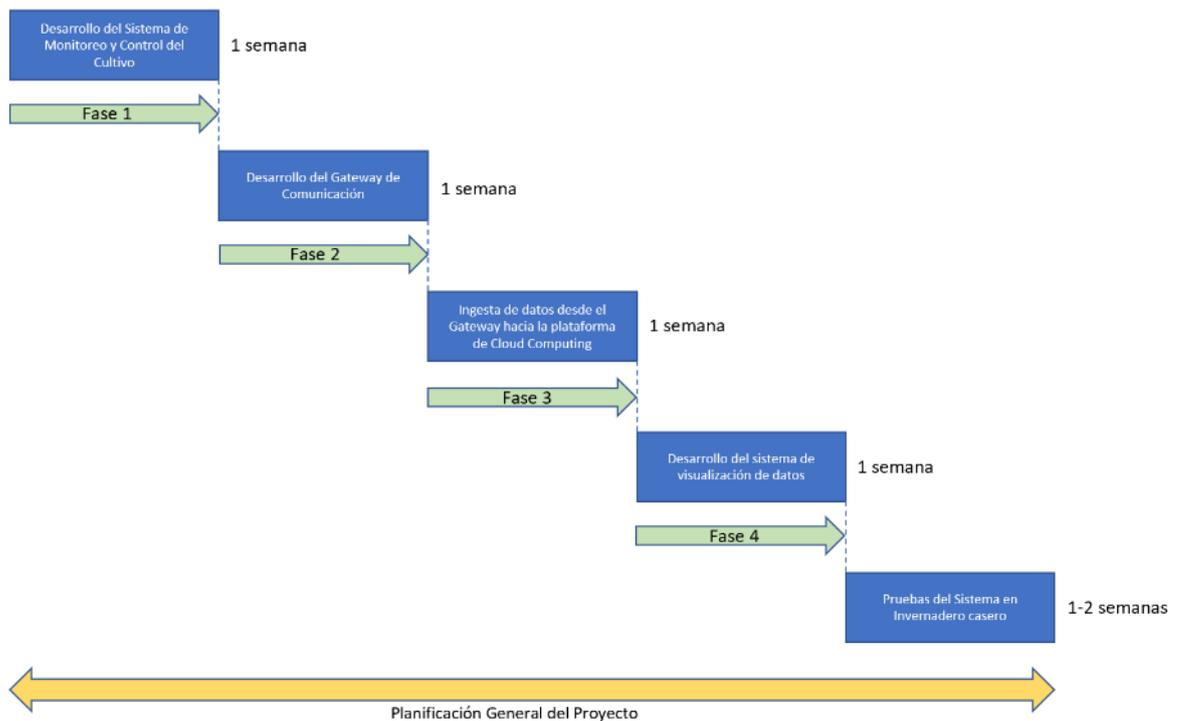
Planificación general

La planificación general del proyecto consistirá en la ejecución de las siguientes fases:

- Fase 1: Desarrollo del Sistema de Monitoreo y Control del Cultivo.
- Fase 2: Desarrollo del Gateway de Comunicación.
- Fase 3: Ingesta de datos desde el Gateway hacia la plataforma de Cloud Computing.
- Fase 4: Desarrollo del sistema de visualización de datos.

Dado que para el diseño e implementación del presente trabajo se utilizará la metodología secuencial de gestión de proyectos el desarrollo del mismo puede esquematizarse, tal como lo muestra la Figura 13:

Figura 13. Planificación General del proyecto



Fuente: Elaboración propia

En el apartado 4 se describirá con mayor detalle la planificación del presente trabajo en la que se detallarán las actividades a realizarse y los tiempos requeridos.

4. Desarrollo específico de la contribución

Dado que el desarrollo para el proyecto está planteado a través de fases lineales, a continuación, se describe cada fase en función de la metodología secuencial que se va a utilizar a lo largo de la implementación del presente trabajo.

4.1. DESARROLLO DEL SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL DEL CULTIVO

Esta fase de desarrollo se centra en el monitoreo de las variables ambientales del lado del sistema de invernadero y en base a las condiciones presentes se tomará acción sobre el control de riego del cultivo. Además, está provista de un módulo de comunicación LoRa que posibilitará la transmisión inalámbrica remota de datos. A continuación, se describen las etapas de desarrollo en términos de la metodología de gestión seleccionada.

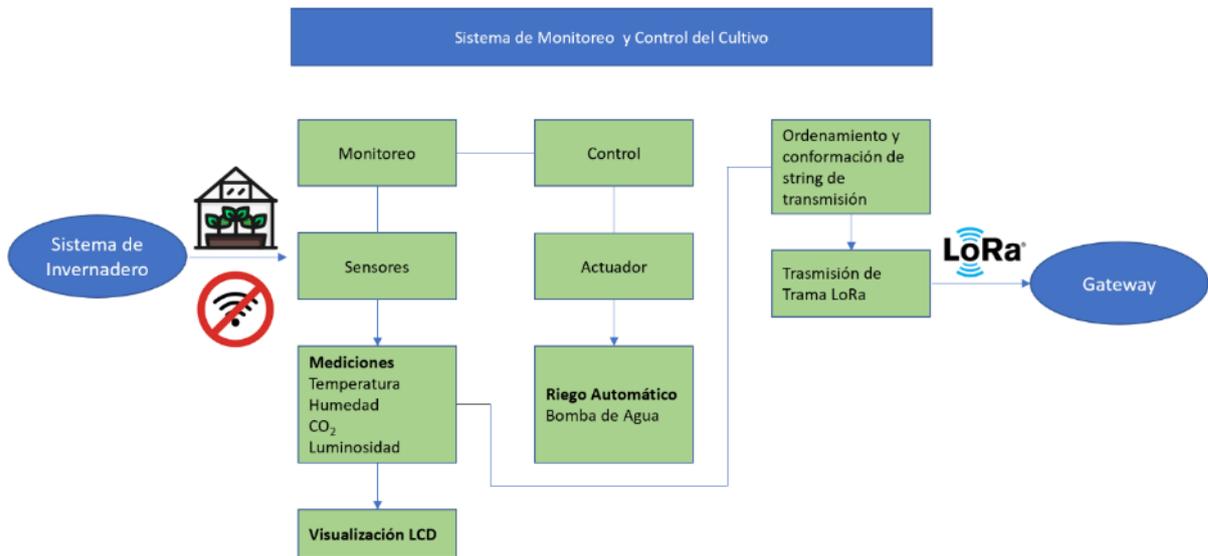
4.1.1. Definición de Requisitos

Basados en la arquitectura de solución propuesta en el presente trabajo, los requerimientos de esta fase se encuentran dados por:

- Monitorización del sistema de invernadero, a través de sensores de temperatura, humedad, CO₂ y luminosidad.
- Validación de las variables ambientales para toma de acción sobre el riego del cultivo, en función de la humedad.
- Visualización de variables ambientales en display LCD.
- Empaquetamiento de información en cadena de texto para transmisión a través de sistema de comunicación LPWAN.
- Comunicación LoRa en banda ISM de 915 MHz. (Transmisión)

4.1.2. Diseño del Sistema

Con el objeto de implementar un sistema que dé solución a los requisitos mencionados en el apartado anterior, se hace necesario realizar el planteamiento del diseño conceptual que se muestra en la Figura 14:

Figura 14. Diseño conceptual del Sistema (Fase 1: Sistema de Monitoreo y Control)

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al diseño propuesto, el sistema se encargará de realizar la monitorización periódica del cultivo a través de la implementación de sensores de temperatura, humedad, CO₂ y luminosidad que estarán controlados por el microcontrolador M5GO, el mismo implementará la lógica necesaria para discriminar los valores ambientales y desplegar en pantalla los valores obtenidos indicando que se encuentran dentro del rango permitido. En base a esta información se tomará acción sobre una bomba de agua que permitirá realizar el riego automático del cultivo.

Finalmente, el sistema empaqueta la información proveniente de los sensores con el fin de que se consolide una cadena de información que será transmitida vía LoRa 915 MHz hacia la fase 2 del proyecto que comprende el uso de un gateway de comunicación.

4.1.3. Implementación del sistema diseñado

Basado en los requisitos planteados y el diseño conceptual propuesto, la implementación del sistema de monitoreo y control del cultivo será llevada a cabo a través del uso de un dispositivo M5GO basado en microcontrolador ESP32 en conjunto con un módulo LoRa trabajando en la frecuencia de 915 MHz. Se usará un módulo de energía M5GO Bottom para dotar de batería al sistema de tal manera que posibilite su funcionamiento con cierta autonomía energética. Para solucionar el tema de monitoreo de las variables ambientales se usará el sensor ENV III (SHT30-QMP6988) para medir temperatura y humedad, el sensor

TVOC/eCO₂ (SGP30) para medir la concentración de CO₂ y el sensor DLIGHT (BH1750FVI-TR) para medir la luminosidad. El detalle de la implementación del sistema en hardware y software se encuentra detallada en los siguientes apartados.

4.1.3.1. Implementación a nivel de hardware

Dispositivo M5GO

Este dispositivo es un sistema que integra un microcontrolador ESP32 programable a través de los IDE⁸ de Arduino, Micropython o UIFlow, que cuenta con una pantalla LCD integrada de 2 pulgadas de tamaño con resolución de 320 x 240 pixeles, puerto de conexión Grove (4 pines) y puerto de conexión GPIO de 30 pines. Su característica fundamental es que puede trabajar en conjunto con otros componentes debido a que su diseño modular permite apilar diferentes módulos evitando la necesidad de realizar excesivas conexiones cableadas. La distribución de pines del microcontrolador y sus puertos está dada por lo mostrado en la Figuras 15, 16 y 17:

Figura 15. Distribución de Pines GPIO del dispositivo M5GO (Vista Interna)



Figura 16. Dispositivo M5GO (Vista Frontal)



Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Dispositivo M5GO (Puertos Grove A, B y C)



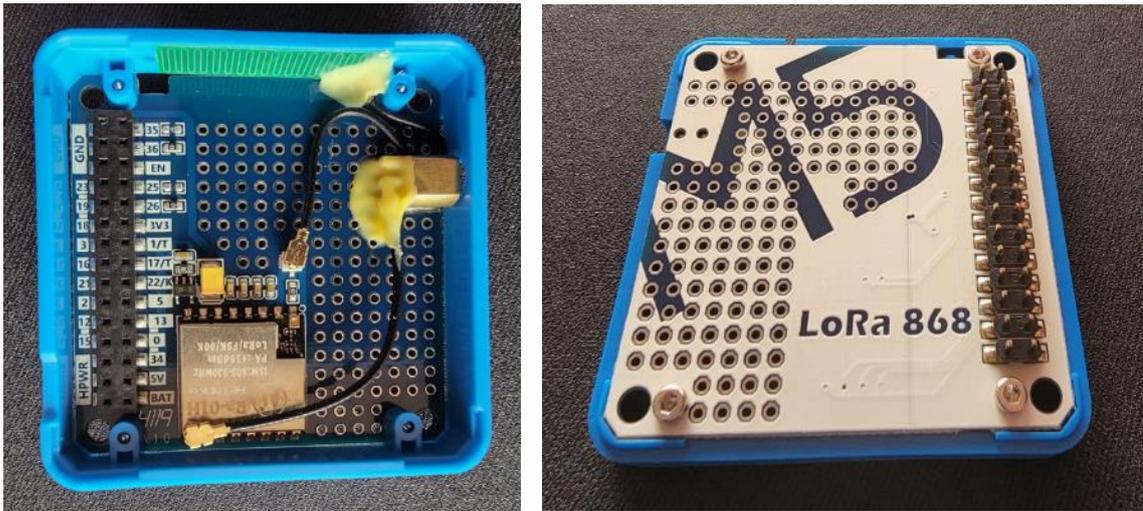
Fuente: Elaboración propia

Para la implementación de hardware del sistema de monitoreo y control de cultivos, será de particular interés el uso de los puertos Grove A y B (4 pines), el manejo del display LCD para implementar la visualización de datos y el puerto GPIO para conexión en stack con el módulo LoRa a 915MHz.

Módulo de Comunicación LoRa

Este componente de extensión está basado en el módulo Ra-01H del fabricante AI-Thinker y está conformado por el chip de radiofrecuencia SX176 que permite la gestión de comunicación LoRa en el rango de frecuencias de 803-930 MHz con niveles de señal de hasta -141 dBm.

La disposición de pines de este componente permite la conexión directa al dispositivo M5GO, tal como se puede apreciar en la Figura 18:

Figura 18. Distribución de Pines Módulo LoRa

Fuente: Elaboración propia

Módulo de Energía

El módulo de conexión utilizado es el M5GO Bottom, el cual provee al sistema de una batería de 500 mAh, que le brindará cierta autonomía al sistema de monitoreo, en el caso de que la energización principal vía USB falle en alguna circunstancia. Asimismo ofrece la posibilidad de contar con los puertos Grove B y C con el fin de poder conectar actuadores y sensores adicionales.

La disposición de pines de este componente es compatible con la disposición del módulo LoRa y el microcontrolador M5GO tal como se puede apreciar en la Figura 19:

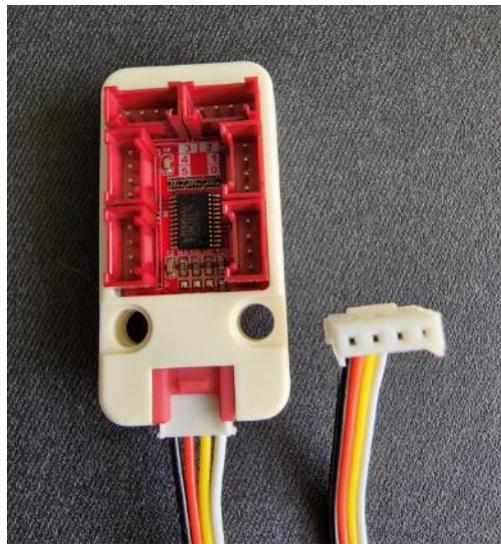
Figura 19. Distribución de Pines módulo de energía M5GO Bottom

Fuente: Elaboración propia

Hub puerto Grove A

Debido a que la implementación del sistema de monitoreo y control requiere la conexión de múltiples sensores con puerto grove (4 pines) compatibles con el puerto A del microcontrolador M5GO, es conveniente utilizar un dispositivo hub que permita con una sola conexión hacia el puerto A, la conexión de varios sensores de manera concurrente. Para tal efecto se implementa el componente Pa.HUB (PCA 9548AP) que permite el uso simultáneo de hasta 6 puertos grove adicionales numerados del 0 al 5. El componente Pa.HUB se muestra en la Figura 20:

Figura 20. Componente Pa.HUB (Hub de puerto A)



Fuente: Elaboración propia

Sensores

Como se ha mencionado a lo largo del desarrollo de este apartado, se hará uso de los siguientes sensores: ENV III (SHT30-QMP6988) para medir temperatura y humedad, el sensor TVOC/eCO2 (SGP30) para medir la concentración de CO₂ y el sensor DLIGHT (BH1750FVI-TR) para medir la luminosidad. Cada uno de estos sensores dispone de un conector grove de 4 pines que se conectará en cada uno de los puertos del hub del puerto A descrito en el apartado anterior, para que se puedan gestionar a través de una sola conexión al puerto A del microcontrolador M5GO. Las variables entregadas por los sensores vienen dadas por las siguientes unidades de medida:

- **Temperatura:** °C (grados centígrados)

- **Humedad Relativa:** %
- **Concentración de CO₂:** ppm (partes por millón)
- **Luminosidad:** lux

Los sensores utilizados en la implementación pueden ser visualizados en la Figura 21.

Figura 21. Sensores de Temperatura, Humedad, CO₂ y Luminosidad



Fuente: Elaboración propia

Bomba de Agua

Con el fin de implementar un sistema básico de riego automático en el cultivo se hará uso del componente Watering Pump del fabricante M5stack, que consiste en una pequeña bomba de agua controlada a través de un puerto grove de 4 Pines, compatible con el puerto B del microcontrolador M5GO. La bomba de succión tiene puertos de entrada y salida de agua donde se conectan mangueras que se comunican al tanque de agua (entrada) y a la parcela de cultivo (salida) respectivamente. De acuerdo al valor de las variables ambientales obtenidas el microcontrolador disparará el funcionamiento de la bomba permitiendo la succión de la entrada de agua y redirigiendo el flujo de agua hacia la parcela de cultivo con el fin de regar el cultivo y estabilizar las condiciones ambientales dentro del invernadero.

El sistema de riego descrito se conectará directamente al microcontrolador a través del uso del puerto B tipo grove que dispone el dispositivo M5GO. En el desarrollo de esta fase del presente trabajo y para efectos de facilitar la ejecución de pruebas de operación los componentes se conectarán sin el uso de estructuras adicionales que permitan fijar de mejor manera los dispositivos, dado que eso está previsto realizar en la fase de pruebas finales con el sistema de invernadero casero.

La bomba de succión utilizada se puede visualizar en la Figura 22 descrita a continuación:

Figura 22. Bomba de succión de agua (Watering Pump)



Fuente: Elaboración propia

Conexión de hardware

Dada la compatibilidad de pines entre el microcontrolador M5GO, el módulo de comunicación LoRa y el módulo de energía M5GO Bottom, la conexión del hardware final del dispositivo consiste en el apilamiento de todos los componentes en este orden:

1. Base M5GO Bottom. (Base)
2. Módulo de Comunicación LoRa (Intermedio)
3. Microcontrolador M5GO (Frontal)

Cabe recalcar que es fundamental que los pines del microcontrolador M5GO y del módulo LoRa G5, G26 y G36, tengan conexión directa entre sí, debido a que permitirán la inicialización del módulo y su posterior configuración. En pruebas con otros módulos de la familia M5GO se pudo evidenciar que otras versiones de microcontrolador no manejan la misma distribución de pines y generan conflicto al inicializar el módulo LoRa.

Para la conexión de los sensores, primero se debe realizar la conexión del componente Pa.HUB al puerto A del dispositivo M5GO y luego en el hub conectar los sensores de Temperatura/Humedad, CO₂ y luminosidad considerando la siguiente asignación descrita en la tabla 8:

Tabla 8. Asignación de puerto en el dispositivo Pa.HUB

Sensor	Asignación Pa.HUB
Sensor de Temperatura	Pa.HUB (Puerto 0)
Sensor de Humedad	Pa.HUB (Puerto 0)
Sensor de CO ₂	Pa.HUB (Puerto 1)
Sensor de Luminosidad	Pa.HUB (Puerto 2)

Fuente: Elaboración propia

La asignación de puertos antes mostrada nos permitirá definir las lógicas para obtención de las lecturas de las variables ambientales provenientes de los sensores conectados al hub.

Finalmente, la bomba de succión de agua se conectará, usando el puerto B tipo grove, directamente al microcontrolador M5GO y será este puerto el que controle el encendido y apagado de la misma.

Basándose en lo mencionado anteriormente la disposición final del hardware queda definida de acuerdo a la Figura 23:

Figura 23. Conexión de hardware del sistema de monitoreo y control



Fuente: Elaboración propia

4.1.3.2. Implementación a nivel de software

Una vez que los componentes del sistema de monitoreo y control se encuentran conectados, el siguiente paso es la programación a nivel de software del microcontrolador M5GO con el fin de crear las lógicas de operación que permitan desarrollar el diseño conceptual descrito en los apartados anteriores. Para este fin se explicarán a detalle los flujos de programación incluidos en el microcontrolador conforme a cada funcionalidad que forma parte del diseño. Cabe destacar que todo el código implementado se incluye como parte de los anexos al final del presente trabajo.

Monitoreo de Variables Ambientales

Con el objeto de monitorizar las variables ambientales dentro del sistema de invernadero, se hace necesario la creación de 4 variables donde se almacenarán los datos provenientes de los sensores de temperatura, humedad, CO₂ y luminosidad. La asignación de estas variables se realiza de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 9.

Tabla 9. Asignación de variables de cada sensor

Sensor	Puerto Sensor Pa.HUB	Variables Originales	Variables Procesadas
Temperatura (ENV III)	Puerto 0	sensorT	Temperatura
Humedad (ENV III)	Puerto 0	sensorH	Humedad
CO ₂ (TVOC/eCO ₂)	Puerto 1	sensorC	CO ₂
Luminosidad (DLIGHT)	Puerto 2	sensorL	Luminosidad

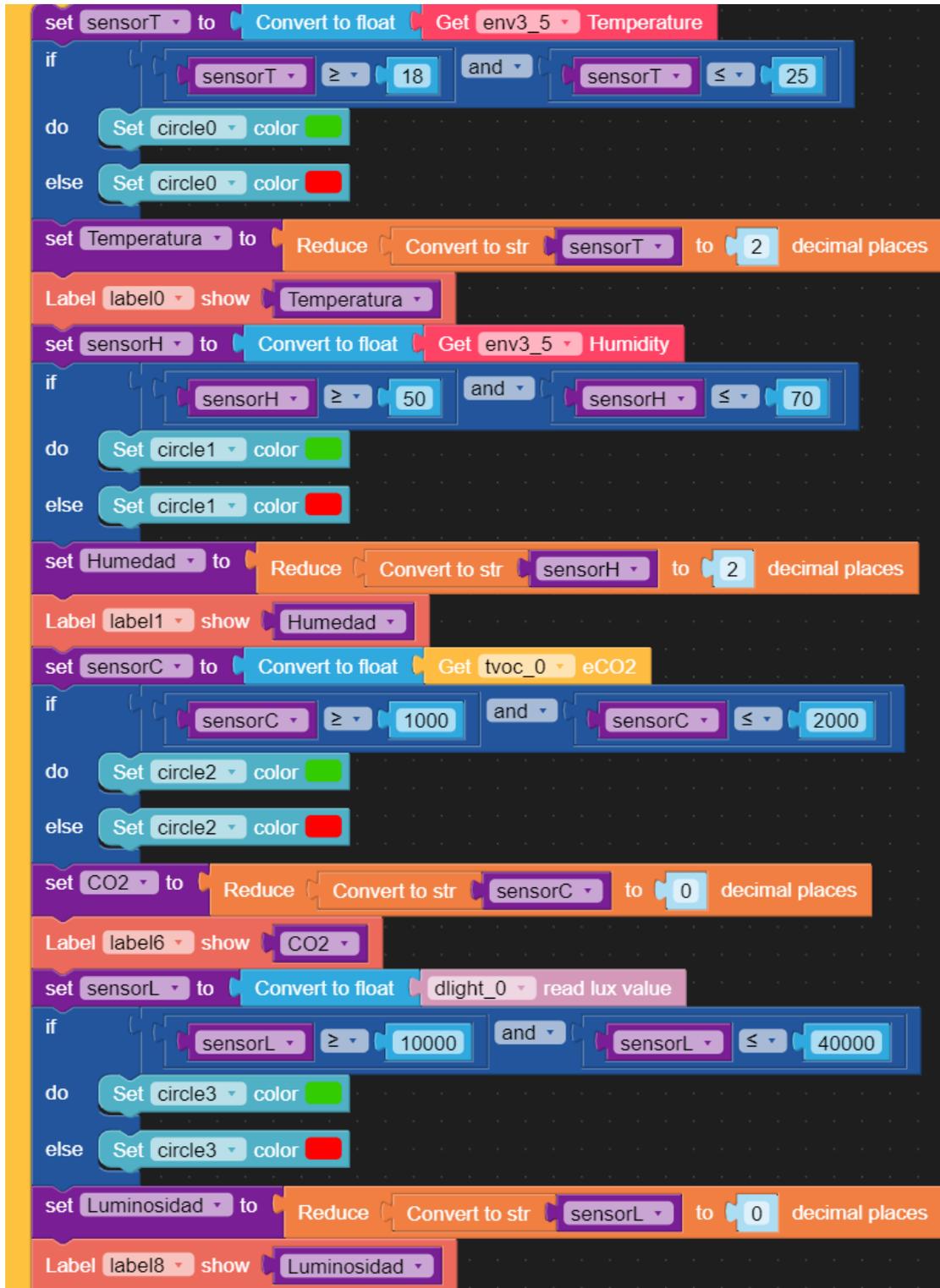
Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 9 es importante considerar que las variables originales son las obtenidas directamente de los sensores y sobre estas variables se aplican un proceso de conversión con el fin de limitar el número de decimales mostrados a través del display LCD a través de etiquetas dinámicas definidas en pantalla. Es así que se forman las variables procesadas descritas en la Tabla 9, que se caracterizan por tener las lecturas de los sensores normalizadas a dos decimales.

En cada lectura de los sensores se aplica un proceso de validación usando para esto los valores umbrales de los parámetros ambientales definidos para el cultivo de tomate, con el fin de desplegar en pantalla la lectura de los parámetros y representando con un círculo verde si el parámetro está en el rango permitido y un círculo rojo si no lo está. Esto permitirá de una manera intuitiva diagnosticar el correcto estado de los cultivos.

El flujo de programación anteriormente descrito puede verse esquematizado en la Figura 24.

Figura 24. Flujo de programación para el monitoreo de variables ambientales



Fuente: Elaboración propia

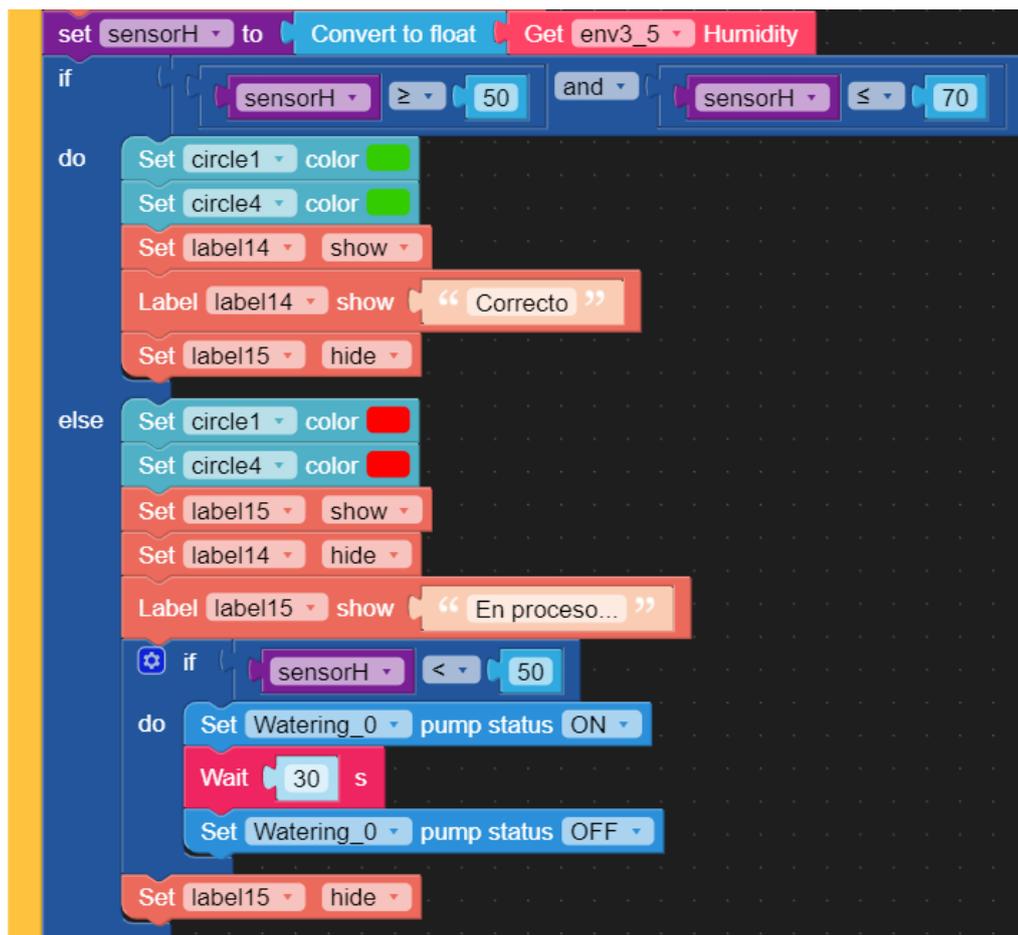
El flujo de la Figura 24, se repite periódicamente a razón de cada 2 minutos por lo que permite generar diariamente información de las variables ambientales de los cultivos, lo que posibilita conocer el estado de los cultivos a lo largo del tiempo.

Control de Riesgo

Para el diseño de la lógica de control del riego del cultivo, partimos del hecho que previamente debemos conocer la lectura de humedad que tenemos en el cultivo, si la misma se encuentra entre 50% y 70% no se accionará la bomba agua, en cambio si la humedad baja del rango inferior, se disparará la bomba que efectuará un período de riego de alrededor de 30 segundos, tiempo en el cual se apagará y dará paso a una nueva lectura con el fin de verificar si la humedad volvió a ubicarse dentro del rango permitido.

El flujo de programación puede esquematizarse en la Figura 25:

Figura 25. Flujo de programación del Control de Riego



Fuente: Elaboración propia

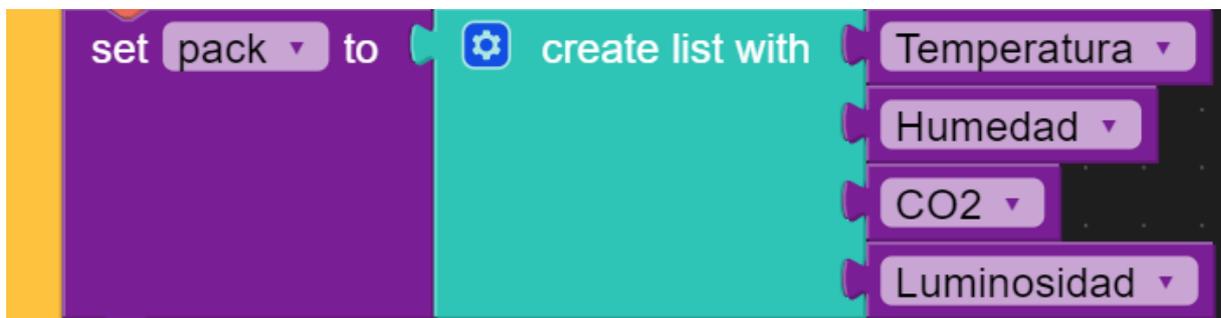
Conformación de cadena de transmisión de datos

Con el fin de poder enviar la información recabada periódicamente en el sistema de invernadero hacia el gateway de la fase 2 y en última instancia a la plataforma de cloud computing seleccionada en el presente proyecto, se hace indispensable contar con un sistema que permita tomar los datos provenientes de los sensores y agruparlos de tal manera que puedan ser transmitidos en una sola cadena de transmisión.

Para poder realizar esto simplemente tendremos que formar una lista o arreglo cuyos elementos van a ser las medidas de temperatura, humedad, CO₂ y luminosidad obtenidas de los sensores, esto permitirá crear una variable cuyo valor englobe a todos los valores de los sensores separados por comas, con el fin de que de lado de recepción sean fácilmente identificables y extraíbles.

El proceso de creación de la cadena de datos para transmisión puede visualizarse en el esquema de la Figura 26.

Figura 26. Conformación de la cadena de transmisión (variable pack)



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la lógica propuesta la variable 'pack' es una lista que contendrá los valores de los sensores de temperatura, humedad, CO₂ y luminosidad separados por comas y para efectos de transmisión de datos será un solo string de información.

Transmisión de datos vía LoRa

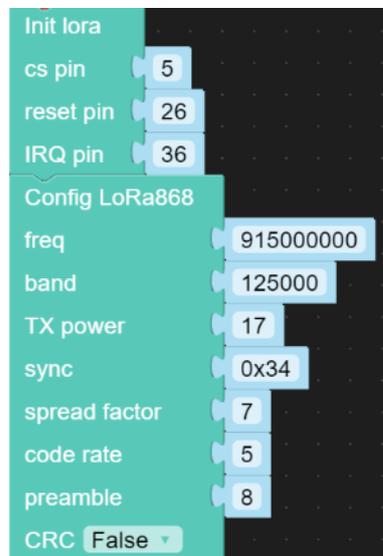
La parte final del sistema de monitoreo y control de cultivos implica la transmisión de la lista de valores de los sensores (string de información) a través de comunicación LoRa en la banda de frecuencia de 915 MHz. Dado que el planteamiento inicial de la problemática contempla que del lado del sistema de invernadero no existen medios de comunicación fijos o móviles

convencionales se ha optado por LoRa como un sistema que permitirá transmitir los datos a largas distancias con el menor consumo de potencia.

Para la implementación de esta parte del sistema se deben tomar en cuenta que se debe incluir código de programación que permita inicializar el módulo LoRa en la frecuencia de 915 MHz y una vez que se obtenga la lista de valores proveniente de los sensores enviar dicho string como un paquete LoRa en función de la periodicidad establecida en el sistema.

El flujo de inicialización del módulo LoRa enviado hacia el gateway puede verse en las Figura 27 mostrada a continuación:

Figura 27. Inicialización y configuración del módulo LoRa en 915 MHz



Fuente: Elaboración propia

Como puede apreciarse la inicialización del módulo consiste en la asignación de los pines CS pin, Reset pin e IRQ pin, a los pines número 5, 26 y 36 del microcontrolador M5GO, permitiendo a través de los mismos la habilitación de la transmisión LoRa en el módulo. A continuación lo que queda por hacer es configurar el módulo LoRa de acuerdo a las definiciones de frecuencia que se van a utilizar. Para la implementación de este proyecto el módulo LoRa se configuró para trabajar en frecuencia 915 MHz, usando canales de 125 KHz a una potencia de 17 dBm.

Por otra parte, para el envío de la lista de datos de los sensores puede incluirse el flujo de programación mostrados en la Figura 28.

Figura 28. Flujo de Programación para transmisión LoRa del string de información



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la lógica detallada anteriormente se propone realizar la inicialización del módulo LoRa con los parámetros de frecuencia especificados en la banda 915 MHz y en cada lectura de los sensores formar y enviar un paquete LoRa con la variable 'pack' que contiene, en forma de lista, los valores de los sensores separados por comas.

4.1.4. Pruebas de Operación

Una vez implementada las lógicas de programación en los componentes de hardware anteriormente descritos, lo que queda es realizar pruebas de funcionamiento del sistema, para esto se va a conectar el hardware y se van a tomar capturas de los parámetros ambientales validando que los sensores registren las medidas físicas, se desplieguen los datos a través de pantalla LCD, la comparación con los valores umbrales se realicen correctamente, los controles de humedad disparen el funcionamiento de la bomba de succión de agua, se conformen los string de información y se complete el envío de los datos a través de LoRa.

En las Figuras 29, 30, 31 y 32, se puede observar el funcionamiento del sistema de acuerdo a los requerimientos planteados para su diseño:

Figura 29. Medición de variables y discriminación de umbrales



Fuente: Elaboración propia

Figura 30. Conformación de string de información ['26.60', '51.54', '400', '82']



Fuente: Elaboración propia

Figura 31. Activación de proceso de riego



Fuente: Elaboración propia

Figura 32. Prueba de transmisión – Recepción LoRa 915 MHz



4.2. DESARROLLO DEL GATEWAY DE COMUNICACIÓN

Esta fase de desarrollo se encargará de implementar un dispositivo IoT que tenga funciones de gateway, es decir, reciba los datos provenientes del dispositivo IoT encargado del monitoreo de los cultivos y los transmita hacia la plataforma de cloud computing seleccionada. Para realizar tal función se definen las siguientes etapas acordes a la metodología de gestión adoptada.

4.2.1. Definición de Requisitos

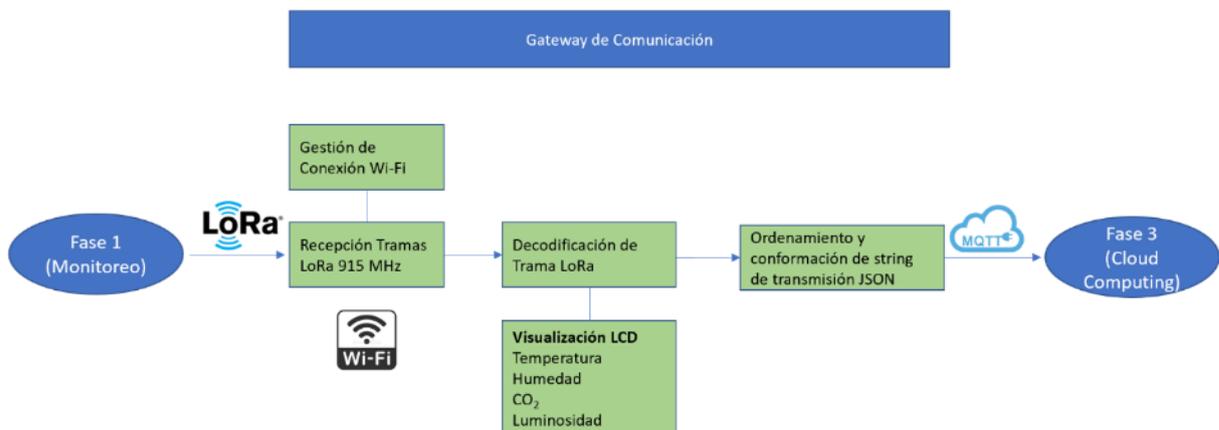
De acuerdo a la arquitectura propuesta las especificaciones técnicas que se deben implementar para el diseño del gateway vienen dadas por:

- Conexión Wi-Fi bajo estándar 802.11 b/g/n.
- Comunicación LoRa en banda ISM de 915 MHz. (Recepción)
- Procesos de decodificación de trama LoRa y obtención de las variables ambientales.
- Rutinas para despliegue de datos en LCD.
- Procesos de conexión segura con la plataforma de Cloud Computing AWS.
- Rutinas de publicación de temas a través del protocolo MQTT.

4.2.2. Diseño del Sistema

En base a los requisitos definidos en el apartado anterior el sistema puede esquematizarse de acuerdo a la Figura 33 mostrada a continuación:

Figura 33. Diseño Conceptual del Sistema (Fase 2: Gateway de Comunicación)



Fuente: Elaboración propia

El sistema gateway de comunicación se encargará de dotar al dispositivo IoT de comunicación inalámbrica Wi-Fi para la transmisión de datos a la plataforma de cloud computing AWS y de comunicación inalámbrica LoRa para la recepción de los datos provenientes de la fase 1 de monitoreo. Con los datos recibidos, se encargará de decodificarlos e individualizar las variables de la cadena de datos (string) para desplegarlos en un display LCD de visualización.

Finalmente se realizará un proceso de ordenamiento y conformación del string de datos en formato JSON⁹ que será transmitido de manera segura a la plataforma Cloud Computing AWS por medio del uso del protocolo MQTT.

4.2.3. Implementación del sistema diseñado

En función de los requisitos planteados y el diseño conceptual especificado, la implementación del gateway de comunicación será llevada a cabo a través del uso de un dispositivo M5GO basado en microcontrolador ESP32 en conjunto con un módulo LoRa trabajando en la frecuencia de 915 MHz, también se usará un módulo de energía M5GO Bottom para dotar de batería al sistema de tal manera que posibilite su funcionamiento con autonomía energética.

4.2.3.1. Implementación a nivel de hardware

Dispositivo M5GO

El módulo M5GO utilizado en esta fase de desarrollo cuenta con las mismas características que el descrito en el apartado 4.1.3.1, sin embargo, para la implementación de hardware del gateway de comunicación será de particular interés el uso del módulo Wi-Fi, el manejo del display LCD para implementar la visualización de datos y el puerto GPIO para conexión en stack con el módulo LoRa.

Módulo de Comunicación LoRa

El módulo LoRa usado para el desarrollo del gateway de comunicación tiene las mismas características que el descrito en el apartado 4.1.3.1, sin embargo, el modo de operación va a ser un poco diferente debido a que la funcionalidad de este va a ser para recibir los datos provenientes del sistema de monitoreo en la fase 1

⁹ JSON: JavaScript Object Notation

Módulo de Energía

El módulo de energía usado en esta fase tiene las mismas características al descrito en el apartado 4.1.3.1, al igual que en la fase 1 la implementación de este componente dotará de cierta autonomía energética en caso de que la fuente principal de alimentación tenga alguna falla permanente.

Conexión de hardware

Dada la compatibilidad de pines entre el microcontrolador M5GO, el módulo de comunicación LoRa y el módulo de energía M5GO Bottom, la conexión del hardware final del dispositivo consiste en el apilamiento de todos los componentes en este orden:

1. Base M5GO Bottom. (Base)
2. Módulo de Comunicación LoRa (Intermedio)
3. Microcontrolador (Frontal)

Cabe recalcar que es fundamental que los pines del microcontrolador M5GO y del módulo LoRa G5, G26 y G36, tengan conexión directa entre sí, debido a que permitirán la inicialización del módulo y su posterior configuración. En pruebas con otros módulos de la familia M5GO se pudo evidenciar que otras versiones no manejan la misma distribución de pines y generan conflicto al inicializar el módulo LoRa.

Basándose en lo mencionado anteriormente, la disposición final del hardware queda definida de acuerdo a la Figura 34:

Figura 34. Disposición Final de hardware (módulos apilados)



Fuente: Elaboración propia

4.2.3.2. Implementación a nivel de software

Una vez que el hardware se encuentra conectado, el siguiente paso es la programación a nivel de software del microcontrolador M5GO con el fin de crear las lógicas que permitan desarrollar el diseño conceptual descrito en los apartados anteriores. Para este fin se explicarán a detalle los flujos de programación incluidos en el microcontrolador conforme a cada componente que forma parte del diseño. Cabe destacar que todo el código implementado se incluirá como parte de los anexos del presente trabajo.

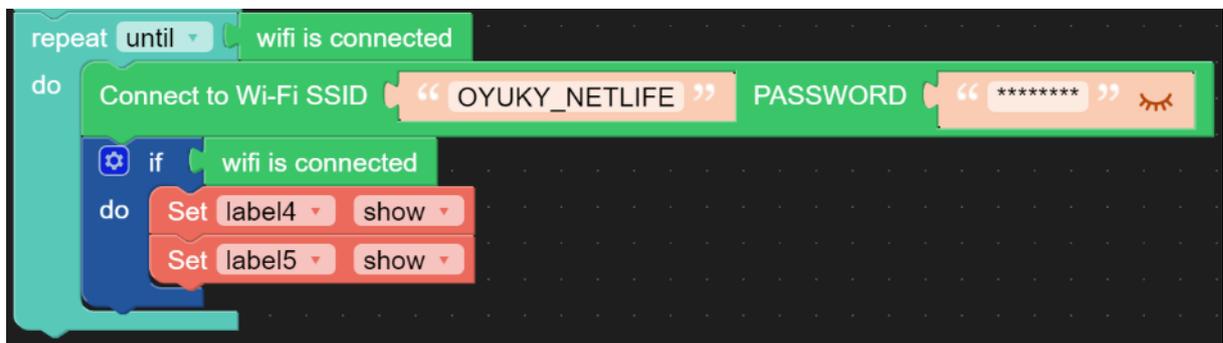
Gestión de conexión inalámbrica Wi-Fi

Con el fin de gestionar la conectividad Wi-Fi del módulo, dentro de la programación inicial del microcontrolador se ha incluido una rutina para que se escanee el SSID¹⁰ Wi-Fi con el que se trabajará y trate de acceder a la red Wi-Fi definiendo previamente el password a utilizarse.

La rutina se encuentra dentro de un bucle que se repite hasta que el dispositivo alcance la conexión exitosa al punto de acceso Wi-Fi, seguidamente se escribirá en la pantalla LCD el estado de la conexión para que se pueda dar fácilmente un diagnóstico de conectividad.

El flujo de programación implementado se puede apreciar claramente en la Figura 35:

Figura 35. Flujo de programación conexión Wi-Fi



Fuente: Elaboración propia

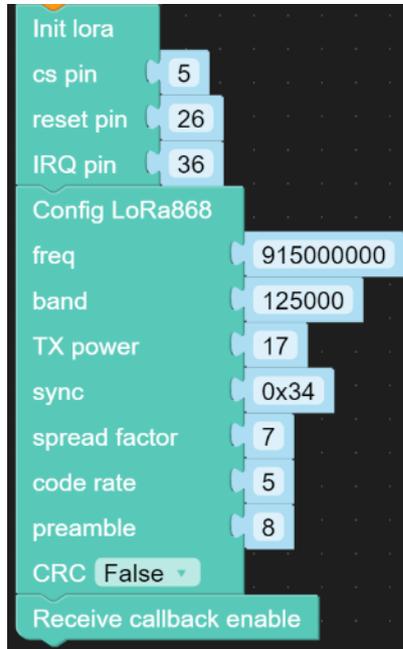
Gestión de Inicialización y Configuración LoRa

Para habilitar el módulo LoRa acoplado con el microcontrolador M5GO se debe realizar la inicialización y configuración del módulo con el fin de que esté listo para la recepción de las

¹⁰ SSID: Service Set Identifier

tramas LoRa provenientes de la fase 1 de monitoreo de los cultivos, para realizar esta tarea se debe seguir el flujo de programación mostrado en la Figura 36:

Figura 36. Inicialización y configuración del módulo LoRa



Fuente: Elaboración propia

Como puede apreciarse la inicialización del módulo consiste en la asignación de los pines CS pin, Reset pin e IRQ pin, a los pines número 5, 26 y 36 del microcontrolador M5GO, permitiendo a través de los mismos la habilitación de la recepción LoRa en el módulo. A continuación, lo que queda por hacer es configurar el módulo LoRa de acuerdo a las definiciones de frecuencia que se van a utilizar. Para la implementación de este proyecto el módulo LoRa se configuró para trabajar en frecuencia 915 MHz, usando canales de 125 KHz a una potencia de 17 dBm. Finalmente, se habilita una función de recepción de tramas LoRa para que el módulo reciba los datos de monitoreo de forma periódica.

Decodificación de trama LoRa y visualización de datos en display LCD

Con el objeto de recibir las tramas LoRa y obtener los elementos correspondientes a las variables ambientales se sigue la lógica mostrada en la Figura 37:

Figura 37. Lógica de programación para recibir las tramas y visualizar en LCD

```
LoRa868 callback packet_size
if packet_size
do
  set check to Read packet
  Label label0 show check
  set lista to make list from text Convert to str check with delimiter “,”
  set temperatura to Convert to str in list lista get # 1
  set humedad to Convert to str in list lista get # 2
  set co2 to Convert to str in list lista get # 3
  set luminosidad to Convert to str in list lista get # 4
  set temperaturaF to trim “b\\\"\\\"\\\"” from both sides of temperatura
  set humedadF to trim “\\\"\\\"” from both sides of humedad
  set co2F to trim “\\\"” from both sides of co2
  set luminosidadF to trim “\\\"\\\"” from both sides of luminosidad
  Label label1 show temperaturaF
  Label label2 show humedadF
  Label label10 show co2F
  Label label11 show luminosidadF
```

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la lógica descrita, cuando el módulo LoRa recibe una trama de información salta a una función que almacena en una variable (check) el paquete que proviene del sistema de monitoreo. Dado que el paquete recibido es un string que contiene las variables ambientales separadas por coma, se debe extraer cada variable en función de su posición en el string, es así que se separa el string en las variables temperatura, humedad, Co2 y luminosidad. Dado que el string viene con las cabeceras de trama incluida, es necesario que las variables obtenidas pasen por un proceso de depuración en las que se mantienen solo los valores numéricos de las mediciones, de esta manera se obtienen las variables temperaturaF, humedadF, Co2F y luminosidadF, las mismas que se almacenan en etiquetas que servirán para mostrarse en el display LCD.

Ordenamiento y Conformación de String LoRa en formato JSON

Una vez que se obtienen las variables ambientales del string LoRa recibido y las mismas se despliegan en el display LCD, corresponde pasar a la fase de ordenamiento y conformación del string en formato JSON con el fin de transmitir la información a la plataforma de cloud computing. Para esto se deben crear pares claves/valor con las variables ambientales y convertir este mapeo de datos en string de formato JSON como puede verse en la Figura 38:

Figura 38. Creación de pares clave/valor en formato JSON



Fuente: Elaboración propia

Publicación de temas hacia la plataforma de Cloud Computing a través de MQTT

Debido a que la información de las variables ambientales se encuentra organizada y lista para transmitirse hacia la plataforma de cloud computing, se hace indispensable contar con dos rutinas principales: la inicialización de la conexión hacia la plataforma AWS y la publicación de temas hacia la plataforma AWS.

Con el fin de inicializar la conexión a la plataforma AWS se debe seguir el flujo de configuración mostrado en la Figura 39:

Figura 39. Inicialización de la conexión hacia la plataforma AWS



Fuente: Elaboración propia

Como puede apreciarse, la inicialización de la conexión a la plataforma AWS requiere de contar con los siguientes datos: nombre del objeto creado en AWS, host, puerto y keepalive. Es necesario además contar con los certificados de seguridad del objeto creado en la plataforma AWS para aportar seguridad a las transacciones que llegan a la plataforma de cloud computing. La obtención de dichos certificados y el detalle de cómo crear los objetos en AWS se detallarán en el apartado 4.3.

Finalmente, la publicación de temas se hace a través del método publish, definiendo como tema o tópico la etiqueta "core2/env", cuyos valores corresponden al string JSON que contiene las variables ambientales, tal y como se muestra en la Figura 40:

Figura 40. Publicación del tópico core2/env del string en formato JSON



Fuente: Elaboración propia

Con la implementación de las lógicas descritas se logra publicar periódicamente en el tópico core2/env los strings que contienen las variables ambientales en la plataforma AWS haciendo uso del protocolo MQTT. Lo que sigue es probar el funcionamiento de dicha lógica y la llegada de datos hacia la plataforma AWS.

4.2.4. Pruebas de Funcionamiento

Una vez implementada la lógica de programación descrita en los apartados anteriores, lo que corresponde es probar el funcionamiento de la implementación de esta fase, para lo cual se recibirán datos desde el sistema de monitoreo de la fase 1, los cuales serán procesados por el gateway y visualizados en el LCD, para posteriormente ser organizados en el string JSON y enviados por MQTT hacia el módulo AWS IoT Core de la plataforma de cloud computing AWS.

Lo primero que se debe realizar para la comprobación es abrir el módulo AWS IoT Core con el fin de suscribirse al tópico "core2/env" que contendrá el string JSON con las variables ambientales, tal como se muestra en la Figura 41:

Figura 41. Suscripción al tópic “core2/env” publicado por el gateway



Fuente: Elaboración propia

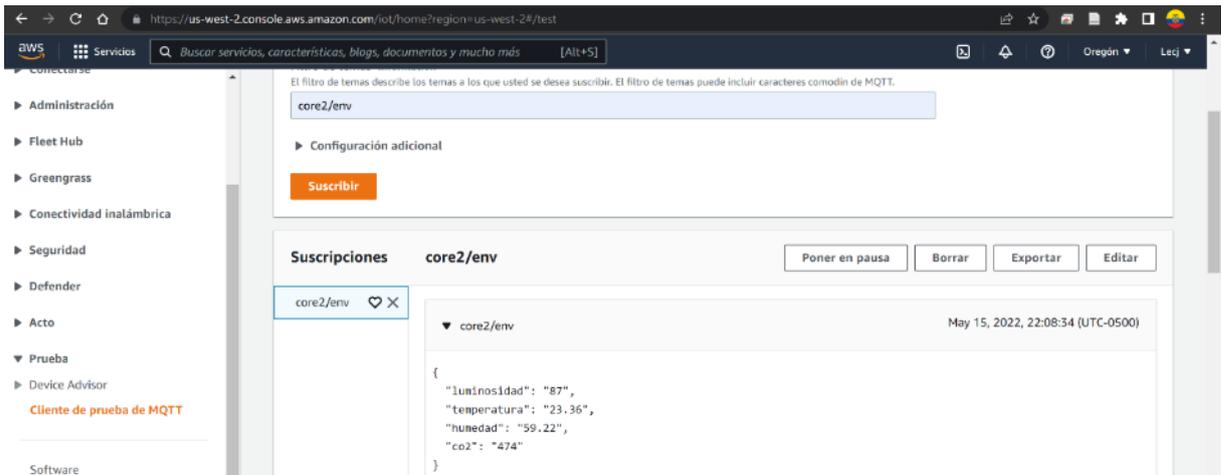
La suscripción a este tópic provocará que en la interfaz de AWS IoT Core se pueda verificar la llegada de los string JSON publicados por el gateway, comprobando así la conectividad entre el dispositivo y la plataforma de cloud computing y además se podrá validar la confiabilidad de los datos recibidos al poderlos comparar con los originados en el gateway, tal como se muestra en las figuras 42, 43, 44 y 45 mostradas a continuación:

Figura 42. String recibido en el gateway a través de LoRa (b"['23.36', '59.22', '474', '87']")



Fuente: Elaboración propia

Figura 43. Llegada de los datos desde el gateway a la plataforma AWS



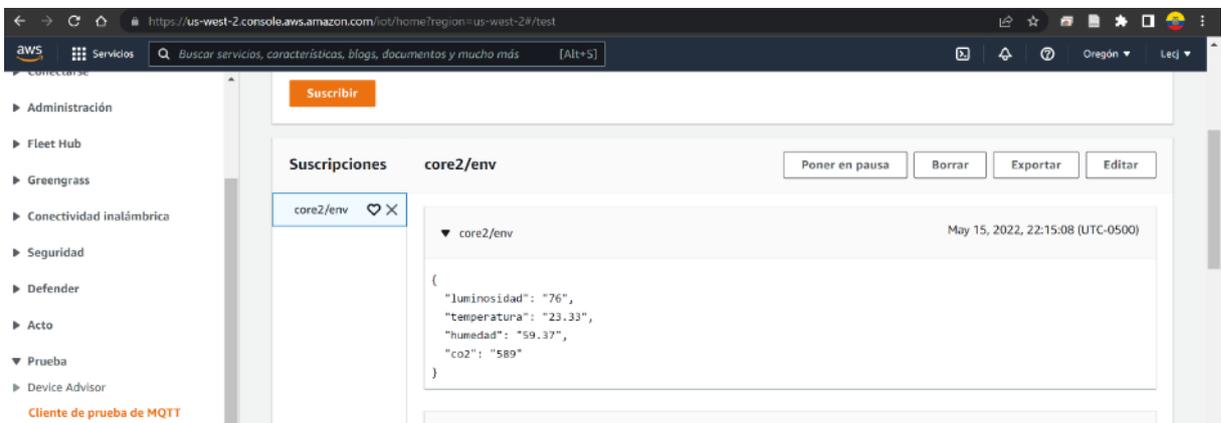
Fuente: Elaboración propia

Figura 44. String recibido en el gateway a través de LoRa (b"['23.33', '59.37', '589', '76']")



Fuente: Elaboración propia

Figura 45. Llegada de los datos desde el gateway a la plataforma AWS



Fuente: Elaboración propia

Como puede apreciarse el sistema se desempeña de manera correcta y recibe los datos a través de LoRa provenientes del sistema de monitoreo de la fase 1, los datos son visualizados en el display LCD y el empaquetamiento de los datos en los string JSON se lleva a cabo de manera adecuada, de la misma forma las configuraciones de conexión hacia la plataforma de cloud computing funcionan de acuerdo a lo esperado y las variables ambientales se reciben a través de MQTT sin sufrir alteraciones.

4.3.INGESTA DE DATOS DESDE EL GATEWAY HACIA LA PLATAFORMA DE CLOUD COMPUTING

Esta fase de desarrollo del presente proyecto contempla la conexión del dispositivo gateway con la plataforma de cloud computing AWS, concretamente el módulo AWS IoT Core, por lo tanto, se revisarán a detalle las configuraciones realizadas en AWS para poder conectar el dispositivo y asegurar la ingesta de datos segura de la información.

4.3.1. Definición de Requisitos

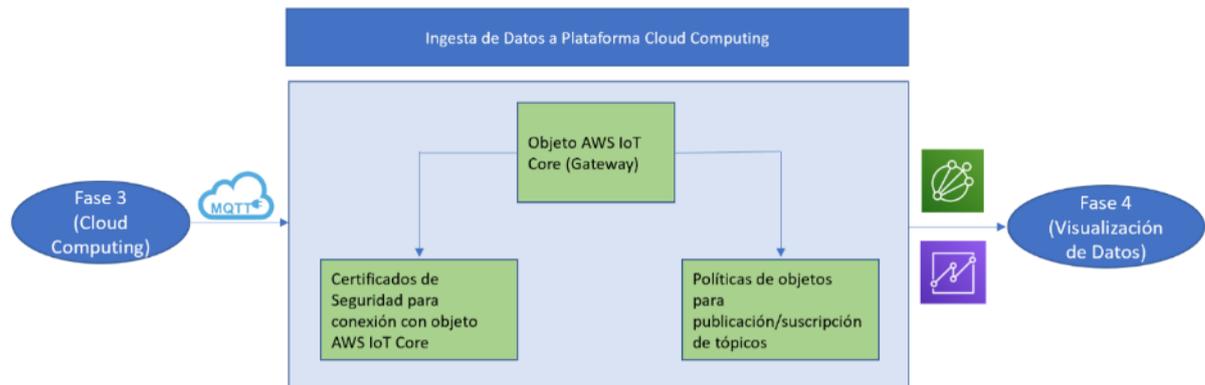
De acuerdo a la arquitectura de referencia empleada en el proyecto, los requisitos que deben cubrirse en la ingesta de datos en la plataforma AWS, son los siguientes:

- Creación del gateway como un objeto dentro del módulo AWS IoT Core.
- Definición de certificados digitales de seguridad del objeto gateway para conexión segura con AWS IoT Core.
- Creación de políticas en el gateway para la publicación de temas.
- Suscripción a temas o tópicos.

4.3.2. Diseño del Sistema

Con el fin de dar cumplimiento a los requisitos del apartado anterior se ha definido el esquema conceptual que se muestra en la Figura 46:

Figura 46. Diseño Conceptual del Sistema (Fase 3: Ingesta de Datos a Plataforma Cloud Computing)



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al esquema mostrado, la ingestión de datos hacia la plataforma AWS consistirá del uso del módulo AWS IoT Core, con el fin de crear un objeto o cosa dentro del módulo que represente la definición del gateway de comunicación de la fase 2, el mismo que deberá tener asignado políticas que definan los accesos para la publicación/suscripción de datos y las definiciones de seguridad que garanticen canales de comunicación seguros entre el dispositivo gateway y la plataforma de cloud computing.

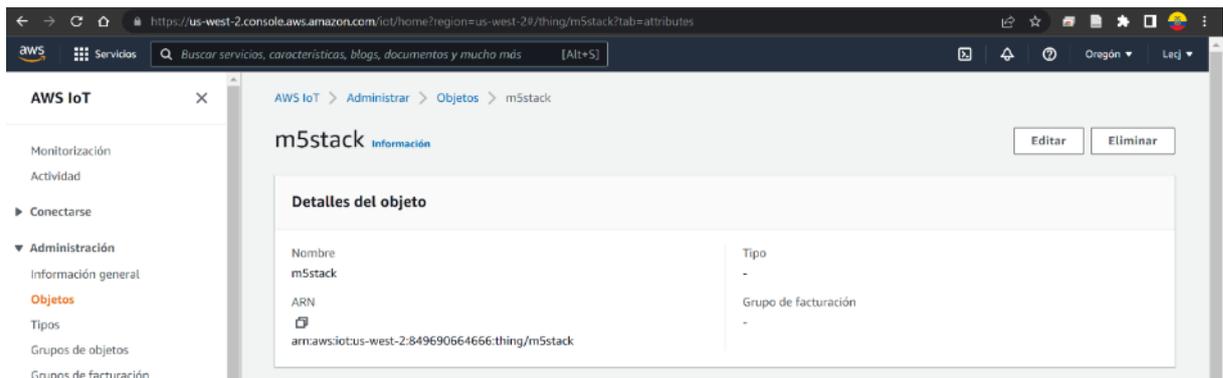
4.3.3. Implementación del sistema diseñado

Con el fin de llevar a cabo el diseño conceptual anteriormente descrito es necesario contar con una cuenta en Amazon Web Services, que nos permitirá el acceso a los módulos de la plataforma. Con el fin de crear un punto conexión entre el dispositivo gateway de la fase 2 y AWS es necesario trabajar con el módulo AWS IoT Core, el mismo que posibilita la integración de varios dispositivos a la nube de manera segura.

Es así que como punto de partida se debe definir un objeto en AWS IoT Core que será la representación digital del gateway de comunicación dentro de la plataforma y permitirá registrar el dispositivo habilitando de esta manera el intercambio de información.

La creación del objeto dentro de AWS IoT Core puede visualizarse en la Figura 47:

Figura 47. Creación del objeto “m5stack” en AWS IoT Core

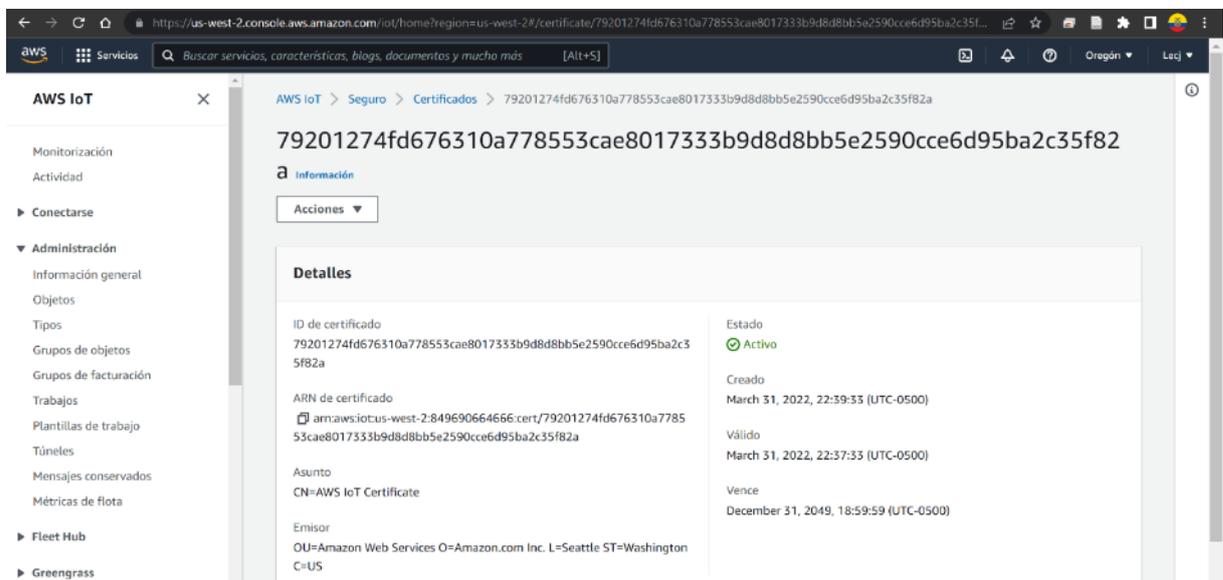


Fuente: Elaboración propia

Una vez creado el objeto en AWS IoT Core, lo siguiente será obtener los certificados digitales asociados a dicho objeto, con el fin de dotar al sistema de seguridad y garantizar que solo el objeto creado pueda autenticarse contra la plataforma AWS y conectarse para la publicación de datos.

La Figura 48 muestra la obtención de los certificados digitales asociados al objeto “m5stack” y el estado Activo de los mismos en el presente trabajo:

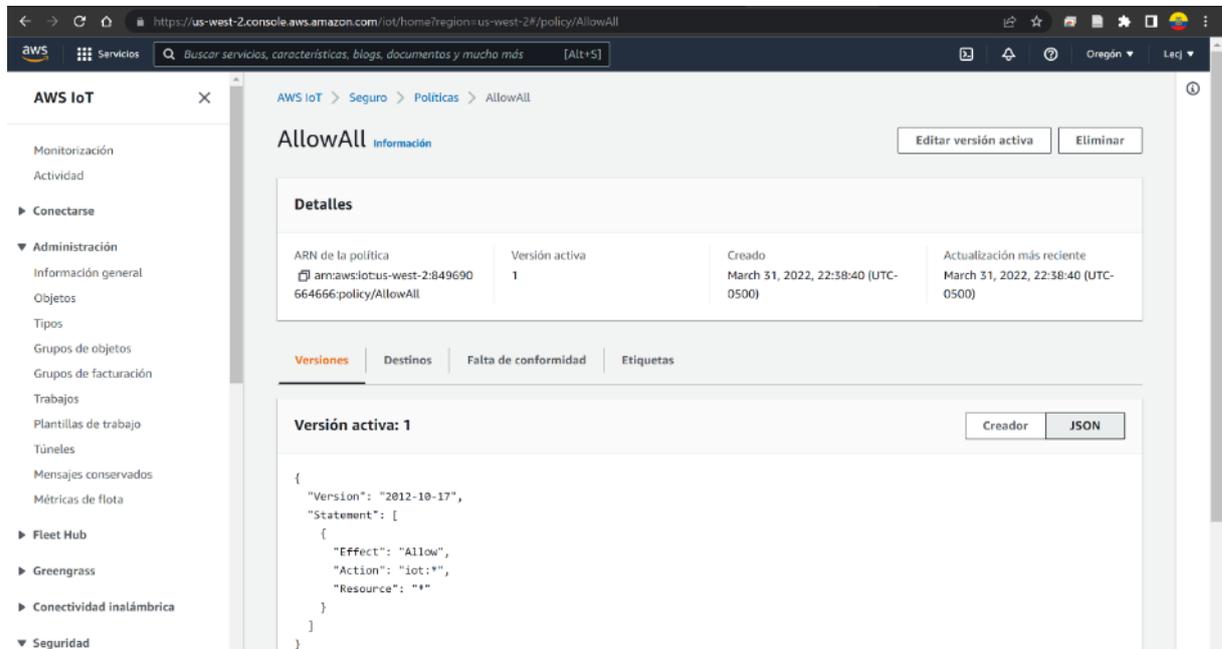
Figura 48. Generación de Certificados Digitales para el objeto “m5stack”



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se deben asignar políticas al objeto con el fin de conceder o denegar el acceso a los recursos del módulo AWS IoT Core. Para el caso del proyecto planteado se creó la siguiente política asociada, que puede apreciarse en la Figura 49:

Figura 49. Política “AllowAll” asociada al objeto “m5stack”



Fuente: Elaboración propia

Una vez que se tiene definido el objeto, los certificados de seguridad y las políticas de acceso a los recursos de AWS IoT Core, se procede a identificar los siguientes parámetros que nos permitirán establecer conexión con la plataforma de cloud computing desde el lado del gateway, los mismos se listan a continuación:

- **Nombre de objeto:** m5stack
- **Punto de enlace:** a15u3k4ypkd8tg-ats.iot.us-west-2.amazonaws.com
- **Puerto:** 8883 (Puerto MQTT sobre SSL¹¹)
- **Keepalive:** 60s
- **Certificados Digitales:** certificate.pem.crt y private.pem.key (Obtenidos desde AWS IoT Core, luego de registrar un nuevo objeto)

¹¹ SSL: Secure Socket Layer (Seguridad de la capa de transporte)

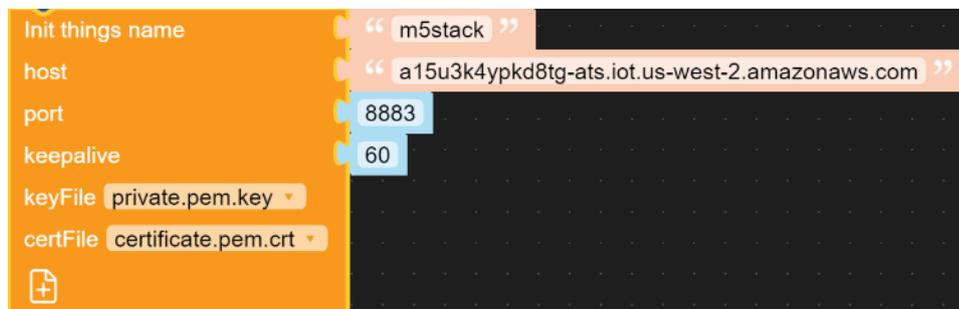
Conocidos estos parámetros la conexión entre el dispositivo y la plataforma de cloud computing puede ser realizada sin ningún inconveniente.

4.3.4. Pruebas de Operación

Con el fin de probar la conexión entre el objeto creado y la plataforma AWS, lo único que se debe hacer es definir los parámetros de conexión del lado del gateway y publicar un tópico con datos que permitirá validar la autenticación del dispositivo con los certificados digitales generados y verificar la llegada de datos en el formato JSON definido en la fase 2 de desarrollo.

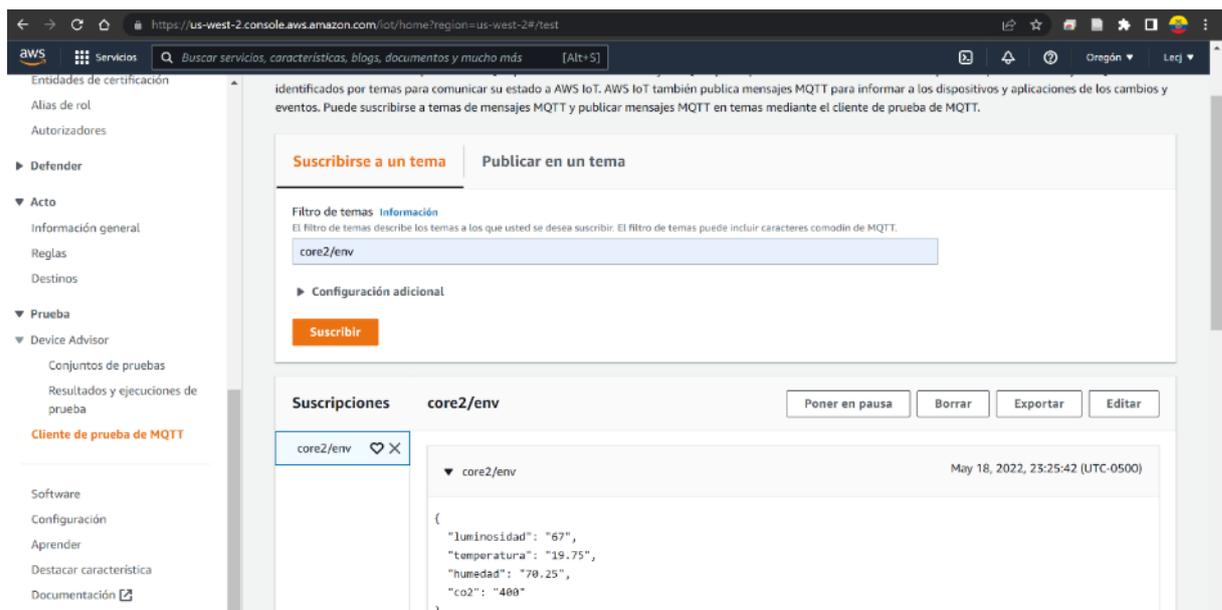
Las Figuras 50 y 51 describen los parámetros de conexión desde el lado del gateway y el establecimiento de conexión con la plataforma AWS.

Figura 50. Parámetros de Conexión del Gateway hacia la Plataforma AWS



Fuente: Elaboración propia

Figura 51. Llegada de datos desde el Gateway a la plataforma AWS a través de MQTT



Fuente: Elaboración propia

4.4.DESARROLLO DEL SISTEMA DE VISUALIZACIÓN DE DATOS

Esta fase de desarrollo del proyecto contempla la creación de un sistema que permita el almacenamiento en bases de datos de la información enviada por el gateway de comunicación hacia la plataforma AWS. La información almacenada permitirá crear un dashboard donde podremos visualizar a través de gráficas, las variaciones de los parámetros principales del sistema de invernadero en función del tiempo.

Para dar solución a esta etapa del proyecto se usarán los módulos AWS IoT Analytics para el almacenamiento de los datos y la herramienta Quicksight para la creación del dashboard de información.

4.4.1. Definición de Requisitos

Los requerimientos que debe cumplir el sistema de visualización de datos son los siguientes:

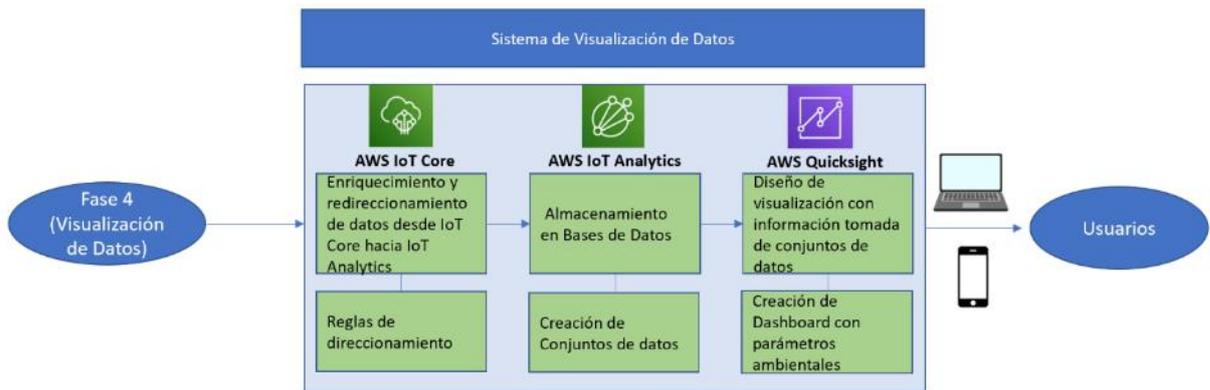
- Creación de reglas para direccionamiento de datos recibidos en AWS IoT Core hacia el módulo AWS IoT Analytics.
- Adición de timestamp a los datos recibidos de parte del gateway con el fin de que cada dato recibido cuente con referencia temporal en formato UTC¹².
- Creación de los conjuntos de datos en el módulo AWS IoT Analytics que permitan almacenar los datos del gateway en bases de datos relacionales.
- Dashboard de visualización de datos en Quicksight que permita mostrar de manera gráfica las variaciones temporales de los parámetros ambientales del sistema de invernadero.

4.4.2. Diseño del Sistema

Con el fin de implementar el sistema de visualización de datos conforme al levantamiento de requisitos del apartado anterior se propone el diseño conceptual planteado en la Figura 52, que se aprecia a continuación:

¹² UTC: Universal Time Coordinated (Tiempo Universal Coordinado)

Figura 52. Diseño Conceptual del Sistema (Fase 4: Sistema de Visualización de Datos)



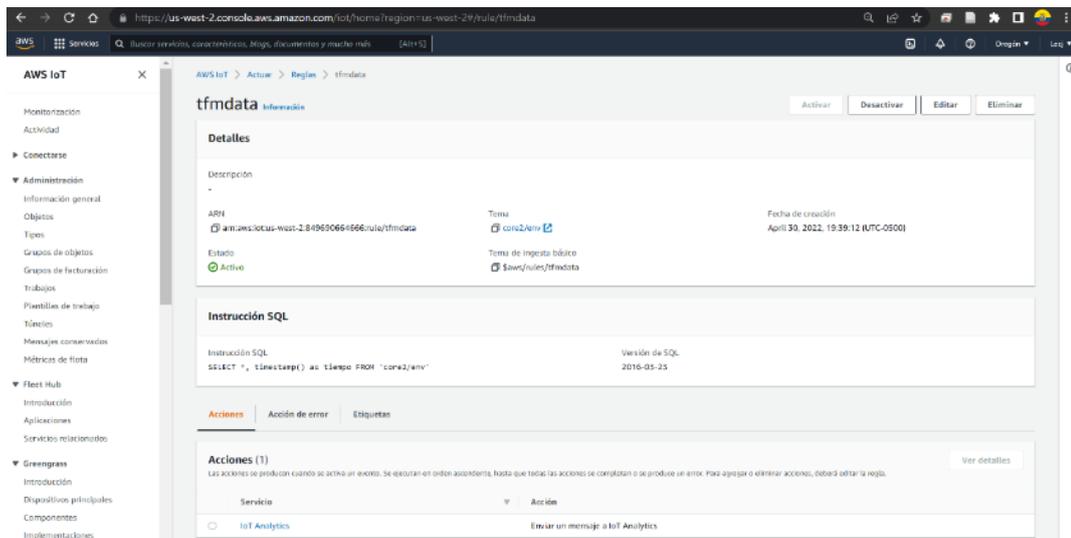
Fuente: Elaboración propia

4.4.3. Implementación del sistema diseñado

Una vez que en la fase 3 del presente trabajo se ha configurado la plataforma AWS para recibir los datos provenientes del gateway de comunicación, el siguiente paso es configurar el módulo AWS IoT Core (donde se reciben los datos) de manera que sobre cada registro que se reciba se ejecute una acción que permita redireccionar cada registro hacia el módulo AWS IoT Analytics para que se puedan almacenar en una base de datos relacional que facilite el acceso a los datos.

La regla creada dentro de AWS IoT Core denominada tfmdata se puede apreciar en la Figura 53:

Figura 53. Creación de regla de direccionamiento en AWS IoT Core



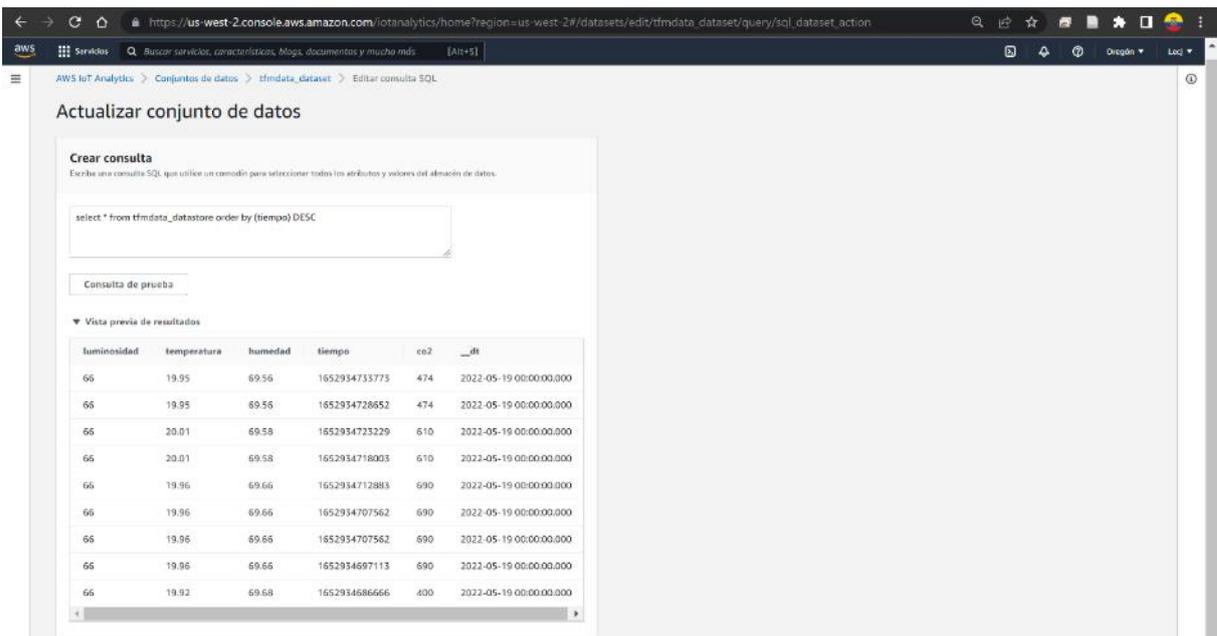
Fuente: Elaboración propia

Como se puede evidenciar, la regla creada tiene la función de redireccionar los datos del tópic “core2/env” hacia el módulo AWS IoT Analytics, además se define una instrucción SQL que lo que permite es tomar todos los datos del string JSON (temperatura, humedad, co2 y luminosidad) y añadir un timestamp en formato UTC para tener referencia temporal de cada cadena de información enviada hacia la plataforma de cloud computing.

La creación de la regla de direccionamiento da paso a la generación del conjunto de datos en el módulo AWS IoT Analytics, que en última instancia posibilita el almacenamiento de los datos en bases de datos relacionales que facilitan el acceso a la información y permiten el uso de los datos para el diseño del dashboard de visualización.

En la Figura 54 se puede apreciar la creación del conjunto de datos tfmdata_dataset que contiene las variables de datos ambientales provenientes del gateway y están enriquecidas con la referencia temporal en formato UTC.

Figura 54. Consulta SQL de prueba sobre el conjunto de datos tfmdata_dataset



The screenshot shows the AWS IoT Analytics console interface. The browser address bar indicates the URL: `https://us-west-2.console.aws.amazon.com/iotanalytics/home?region=us-west-2#/datasets/edit/tfmdata_dataset/query/sql_dataset_action`. The page title is "Actualizar conjunto de datos". Under the "Crear consulta" section, the SQL query is: `select * from tfmdata_datastore order by (tiempo) DESC`. Below the query, there is a "Consulta de prueba" button. The "Vista previa de resultados" section displays a table with the following data:

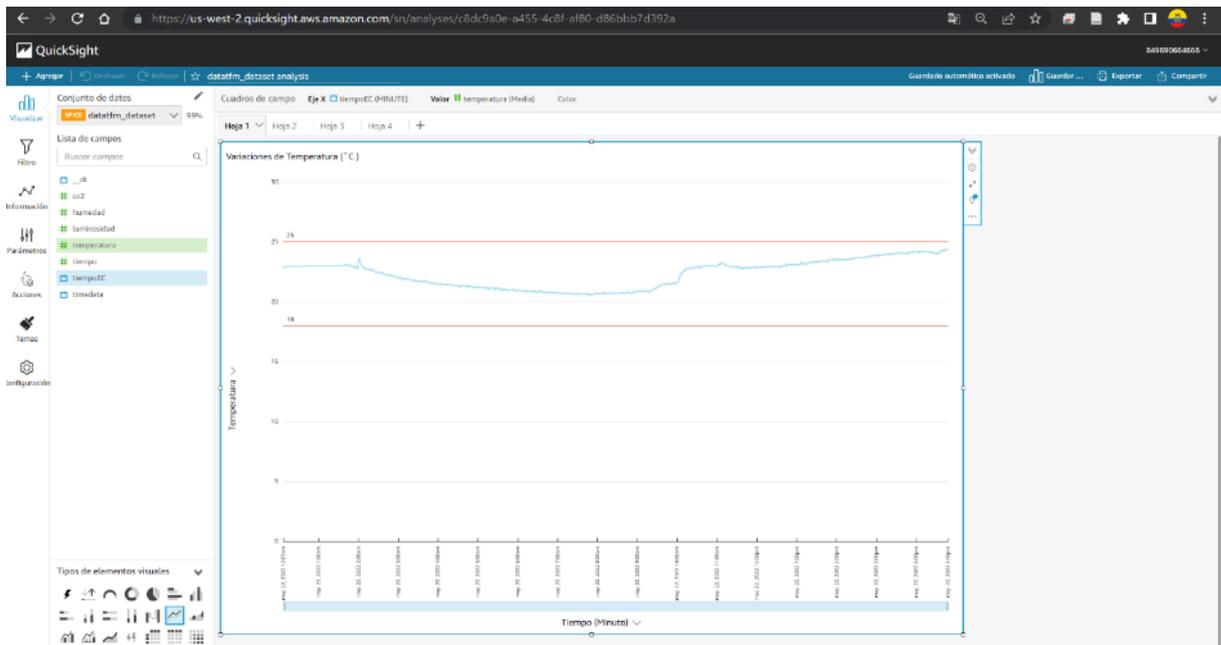
luminosidad	temperatura	humedad	tiempo	co2	__dt
66	19.95	69.56	1652934733773	474	2022-05-19 00:00:00.000
66	19.95	69.56	1652934728652	474	2022-05-19 00:00:00.000
66	20.01	69.58	1652934733229	610	2022-05-19 00:00:00.000
66	20.01	69.58	1652934718003	610	2022-05-19 00:00:00.000
66	19.96	69.66	1652934712983	690	2022-05-19 00:00:00.000
66	19.96	69.66	1652934707562	690	2022-05-19 00:00:00.000
66	19.96	69.66	1652934707562	690	2022-05-19 00:00:00.000
66	19.96	69.66	1652934697113	690	2022-05-19 00:00:00.000
66	19.92	69.68	1652934686666	400	2022-05-19 00:00:00.000

Fuente: Elaboración propia

Dado a que ya se tiene un conjunto de datos sobre el cual trabajar, el último paso de esta fase comprende la creación del dashboard de visualización, el cual está encargado de tomar los datos y organizarlos en forma de gráficas temporales que nos facilitarán la lectura de los datos ambientales a través del tiempo.

Dentro del módulo AWS Quicksight debemos seleccionar el conjunto de datos creado para almacenar los datos del gateway y generar un nuevo análisis, es con esta opción que podremos personalizar el tipo de gráficas a utilizarse, así como también las variables que se van a mostrar en cada gráfico, tal como se puede ver en la Figura 55:

Figura 55. Diseño de dashboard con las variables del conjunto de datos tfmdata_dataset



Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que para la construcción del dashboard de visualización se ha tomado como variables principales a los parámetros de temperatura, humedad, CO₂ y luminosidad, graficados en función del tiempo, con el objeto de que se pueda apreciar su variación temporal y los límites umbrales definidos, para tener una perspectiva de la evolución de los parámetros ambientales dentro del sistema de invernadero.

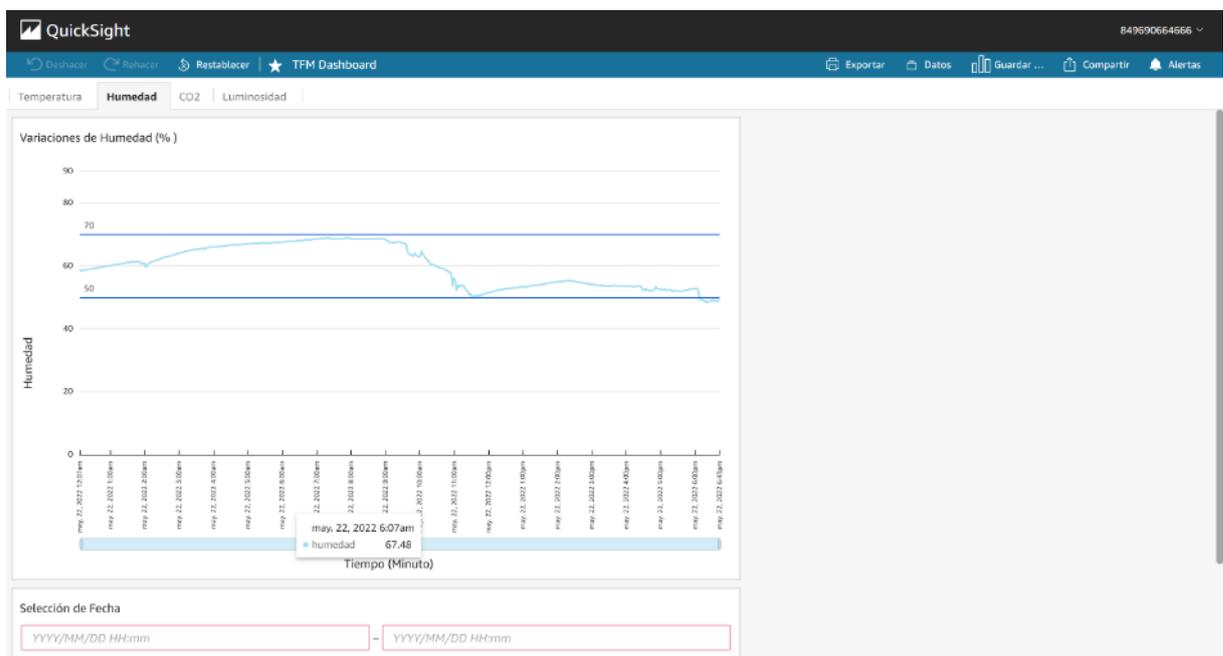
Dentro del dashboard diseñado, se puede apreciar la inclusión de 4 gráficas principales referidas a las variables Temperatura (Hoja 1), Humedad (Hoja 2), CO₂ (Hoja 3) y Luminosidad (Hoja 4), cada gráfica se encuentra en una hoja independiente con el fin de que sea fácilmente visualizable y entendible por el usuario.

Se ha incluido en cada gráfica los valores umbrales especificados a través de líneas de color de referencia y un filtro mediante el cual podremos hacer selección de rangos de fechas para verificar las variaciones temporales por períodos de tiempo.

Cabe destacar que se ha programado Quicksight para que actualice el conjunto de datos cada hora, por tanto, cada hora podremos tener actualizado nuestro dashboard automáticamente y verificar los valores de los parámetros ambientales a través del acceso Web que provee la herramienta, así como también a través de la aplicación Quicksight disponible para Android e iOS desde una tablet o teléfono móvil.

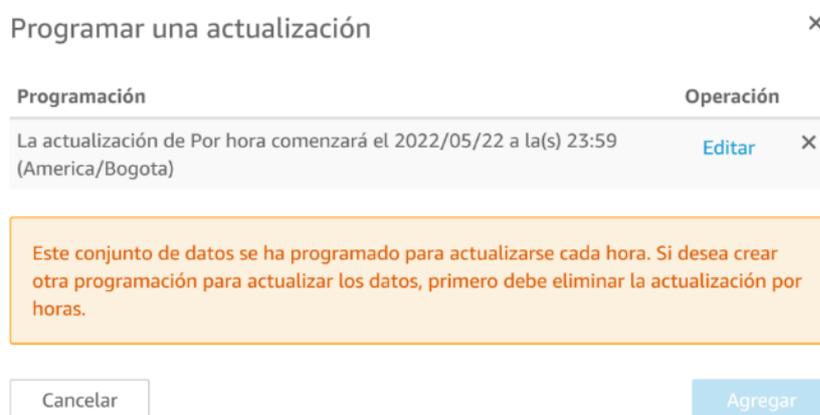
Las configuraciones antes descritas pueden verse plasmadas en las Figuras 56 y 57, mostradas a continuación:

Figura 56. Dashboard para la variable ‘Humedad’



Fuente: Elaboración propia

Figura 57. Programación de actualización de conjunto de datos por hora



Fuente: Elaboración propia

4.4.4. Pruebas de Operación

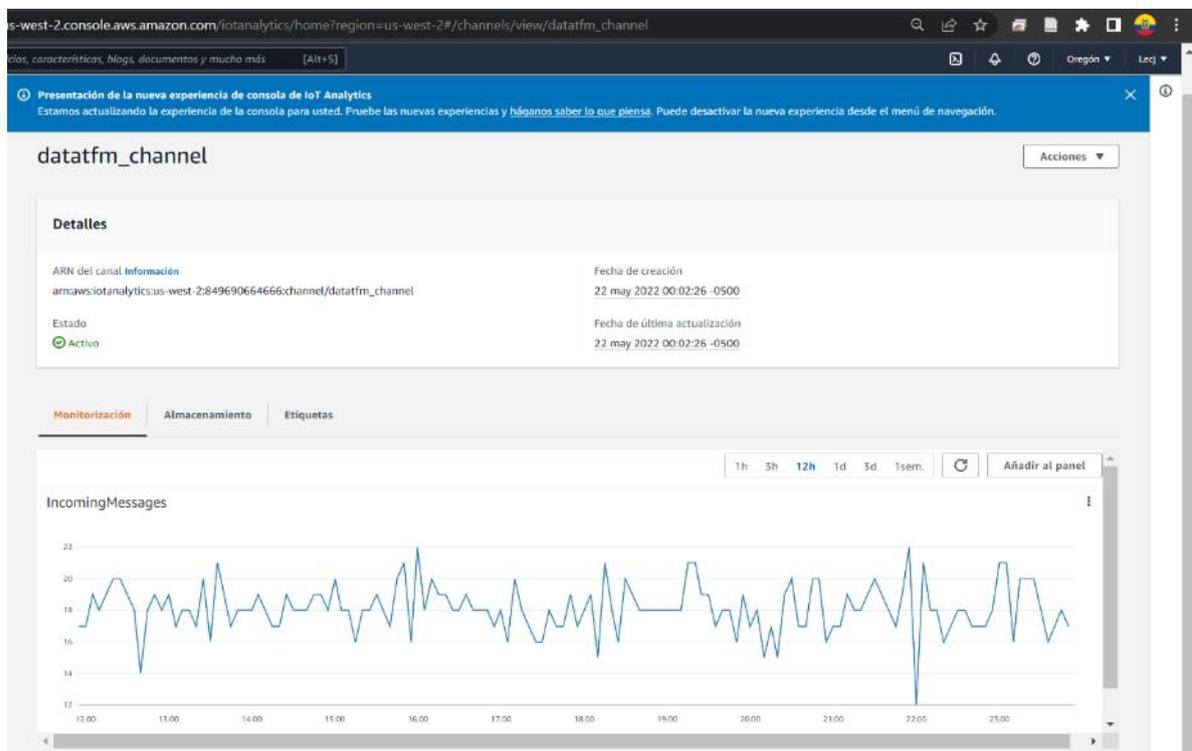
Con el fin de realizar pruebas básicas de operación del sistema, se ha optado por realizar la medición de los parámetros de temperatura, humedad, CO₂ y luminosidad dentro de una habitación por alrededor de 19 horas con el fin de comprobar el funcionamiento global de las 4 fases desarrolladas en los apartados anteriores y verificar la generación/direccionamiento de datos y su visualización a través del dashboard diseñado en Quicksight, a continuación, se describen los resultados obtenidos:

Comprobación de redireccionamiento de mensajes hacia AWS IoT Analytics

Con el fin de validar que la regla de direccionamiento de mensajes MQTT creada en AWS IoT Core se encuentre operando adecuadamente, se debe acceder al módulo AWS IoT Analytics y seleccionar el canal correspondiente de acuerdo al conjunto de datos creado, para comprobar dentro de las estadísticas de monitorización la llegada de mensajes de entrada (incoming messages) que representan los mensajes que salen de AWS IoT Core y llegan a AWS IoT Analytics.

La validación del canal puede verse en la Figura 58 que se muestra a continuación:

Figura 58. Validación de tráfico en el canal `datatfm_channel`



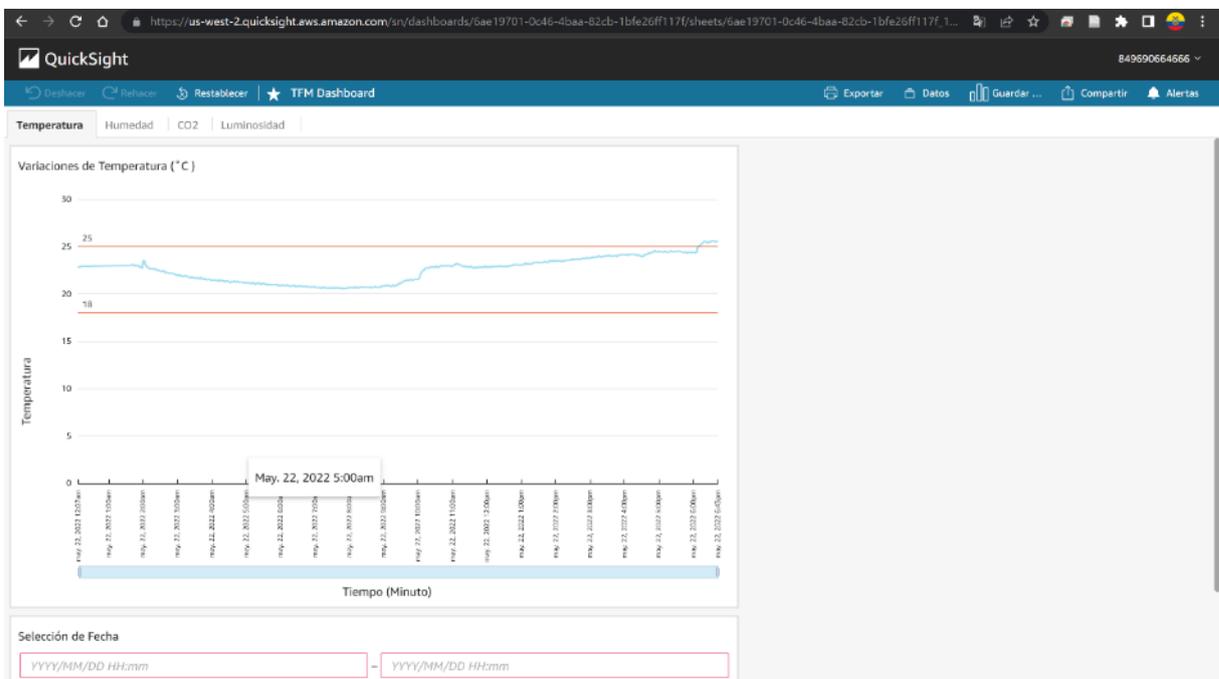
Fuente: Elaboración propia

Visualización de datos en dashboard (Acceso Web)

Una vez comprobado que la regla funciona de acuerdo a lo esperado y el módulo AWS IoT Analytics está recibiendo los mensajes MQTT enviados por el gateway y redireccionados por AWS IoT Core, el siguiente paso es comprobar si el dashboard actualiza el conjunto de datos y por ende las gráficas de las variables ambientales. Para esto se abre la herramienta Quicksight a través del acceso Web y seleccionamos cualquiera de las hojas creadas en el dashboard.

En la Figura 59 podemos apreciar las variaciones temporales de la variable 'Temperatura' en el período de observación.

Figura 59. Variación temporal de la variable Temperatura en el dashboard (Acceso Web)



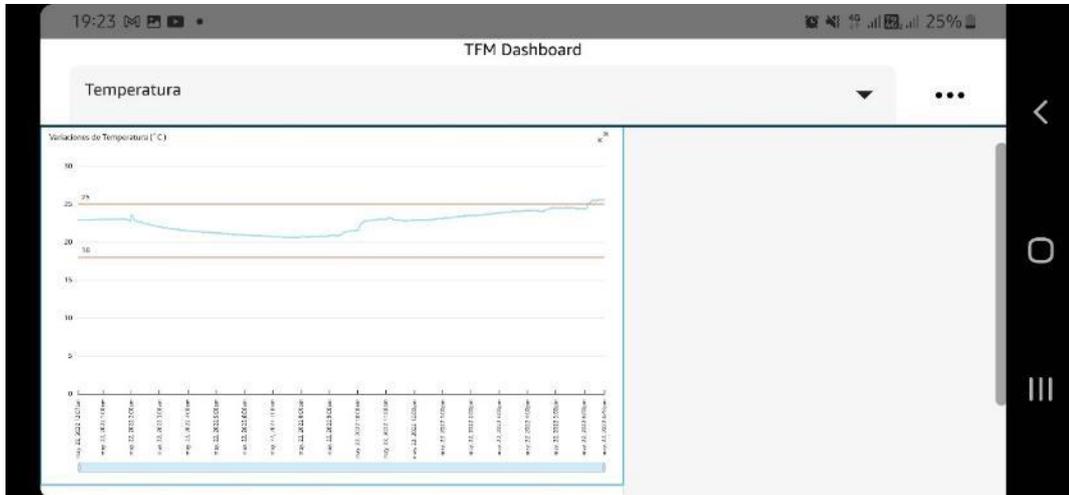
Fuente propia

Visualización de datos en dashboard (Aplicación Quicksight Android)

De la misma manera que se realizó la comprobación en el acceso Web de la herramienta Quicksight, esta validación consiste en la instalación del aplicativo Quicksight, descargado sobre un equipo Android 12 desde Google Play Store. A través del uso de las credenciales otorgadas en AWS se accederá al dashboard creado y se validará el despliegue de los datos sobre los gráficos temporales tal como se realiza a través del acceso Web.

En la Figura 60 se puede apreciar los resultados obtenidos usando la aplicación móvil Quicksight:

Figura 60. Dashboard de la variable Temperatura en la aplicación móvil Quicksight

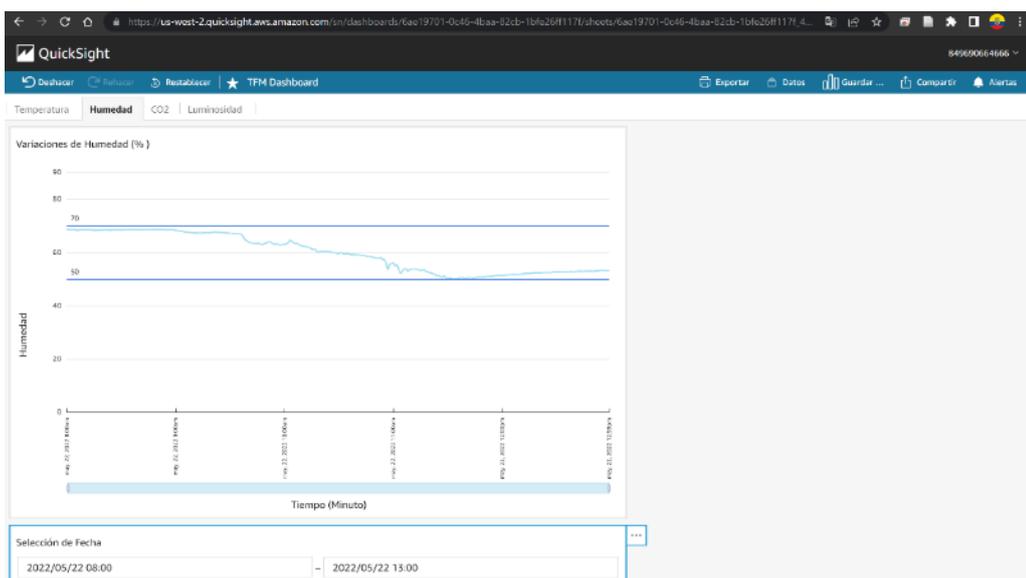


Fuente: Elaboración propia

Comprobación del uso de filtros en el dashboard

Dado que todas las gráficas creadas en el dashboard tienen filtros de selección de rango de fechas y horas, para validar esta funcionalidad se escogió la variable 'Humedad' y se realizó un filtro de datos de 5 horas, los resultados pueden verse en la Figura 61 mostrada a continuación:

Figura 61. Filtro de 5 horas aplicado a la variable 'Humedad'



Fuente: Elaboración propia

4.5. PRUEBAS DEL PROTOTIPO EN EL SISTEMA DE INVERNADERO CASERO

4.5.1. Montaje del Invernadero Casero

Con el objeto de poner a prueba el sistema diseñado e implementado en los apartados anteriores, se optó por el montaje de una infraestructura casera de invernadero basada en un marco metálico de acero revestido con paredes de poliestireno transparente, de 45 cm de ancho, por 35 cm de alto y 25 cm de espesor. Dicha estructura descansará sobre una base rectangular de acero sobre donde se colocará el cultivo que se monitoreará.

En las figuras 62, 63 y 64 se pueden visualizar las etapas de montaje del sistema implementado.

Figura 62. Estructura prefabricada de invernadero casera



Fuente: Elaboración propia

Figura 63. Montaje de paredes laterales



Fuente: Elaboración propia

Figura 64. Armado final de la estructura de invernadero casero



Fuente: Elaboración propia

4.5.2. Instalación de Sensores y Bomba de Agua

Una vez que se tiene la estructura de invernadero completamente armada lo que corresponde es la fijación en dicha estructura del dispositivo IoT, los sensores y la bomba de agua descritos en el apartado 4.1. Para esto fue necesario trabajar con una placa de madera sujeta a la maceta del cultivo, donde se ubicará el dispositivo M5GO. Se aprovechará la placa para facilitar la sujeción del hub de conexiones del puerto A del microcontrolador y los sensores de temperatura, humedad, dióxido de carbono y luminosidad, tal como se puede ver en la Figura 65:

Figura 65. Montaje de sensores y bomba de agua en la maceta de cultivo



Fuente: Elaboración propia

Como puede apreciarse en la Figura 65, la bomba de agua se sujeta en la propia tierra de la maceta de cultivo y sus mangueras estarán dispuestas de tal manera que la entrada de agua se encuentre dentro del envase que se usará como fuente de riego y la salida se encuentre dentro de la maceta.

La disposición final de este sistema en conjunto con el invernadero pueden observarse en las Figuras 66, 67 y 68 mostradas a continuación:

Figura 66. Fijación de sensores de temperatura, humedad y CO₂ dentro del invernadero



Fuente: Elaboración propia

Figura 67. Fijación de sensor de luminosidad en pared superior del invernadero



Fuente: Elaboración propia

Figura 68. Montaje final del sistema de invernadero casero



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 68 se muestra el montaje final del sistema, como puede apreciarse, el dispositivo IoT se encontrará sujeto a la maceta de cultivo, los sensores se fijarán a las paredes laterales y superiores de la estructura de invernadero, la bomba de agua estará insertada en la propia tierra de la maceta y la entrada de la misma se conectará a la fuente de agua con el propósito de posibilitar el riego automático.

4.5.3. Período de Observación y Pruebas

Luego de implementar el sistema en su totalidad, el desarrollo del presente trabajo consistió en una prueba continua de su funcionamiento por alrededor de 10 días, con el fin de validar la gestión del flujo de los datos obtenidos del invernadero, los disparadores del control de riego automático y la actualización de los sistemas de visualización configurados en la plataforma Amazon Web Services. Para tal efecto, se consideró el período comprendido entre el 23/05/2022 al 24/05/2022 y del 23/06/2022 al 03/07/2022, donde se sometió al sistema al contacto directo con la luz ambiente, en un esquema controlado, donde el gateway se ubicó

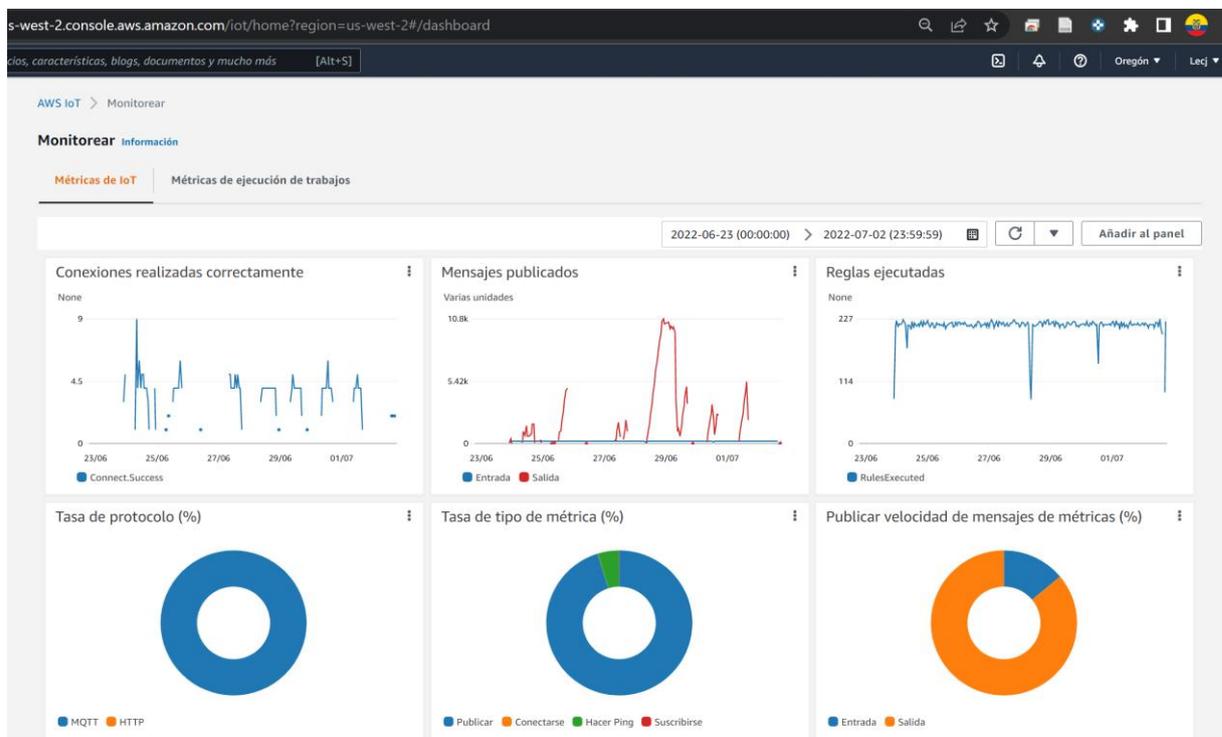
a 30 metros de la fuente de origen de los datos. Los resultados de las pruebas se muestran en los siguientes apartados:

4.5.3.1. Validación del flujo de datos

Dentro del período de observación, se pudo evidenciar un comportamiento estable del sistema, ejecutando la transmisión LoRa de los datos recabados del sistema de invernadero periódicamente y recibéndolos en el módulo AWS IoT Core mediante el uso del protocolo MQTT exitosamente.

Esto se pudo evidenciar gráficamente a través del sistema de monitorización de AWS IoT Core representado en la Figura 69, mostrada a continuación:

Figura 69. Métricas de conexión MQTT al módulo AWS IoT Core

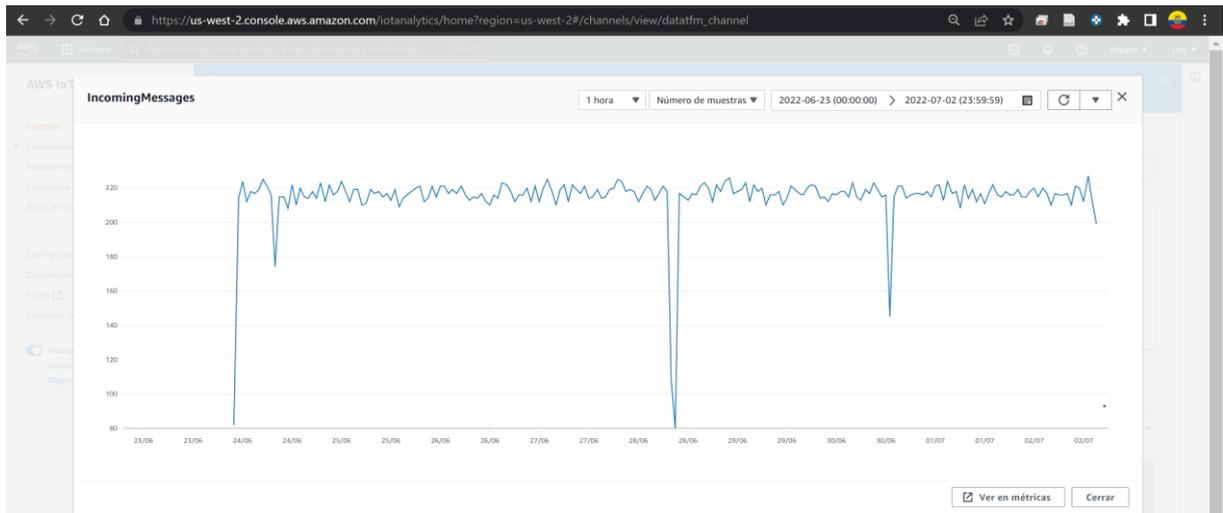


Fuente: Elaboración propia

Como era de esperarse, en las métricas mostradas en la Figura 69, se puede observar la continuidad de funcionamiento del sistema en el período de pruebas definido, verificándose el uso del protocolo MQTT para la ingestión primaria de datos en AWS y la ejecución de las reglas de direccionamiento para su almacenamiento en las bases de datos de analítica.

Del lado del módulo AWS IoT Analytics, se pudieron evidenciar la recepción de los mensajes entrantes provenientes de IoT Core, tal como se muestra en la Figura 70:

Figura 70. Métricas de mensaje entrantes de IoT Core recibidos en IoT Analytics



Fuente: Elaboración propia

Los mensajes recibidos desde AWS IoT Core hacia AWS IoT Analytics generarán las actualizaciones del conjunto de datos donde se obtiene la información para los sistemas de visualización, las cuales se pueden visualizar en las Figuras 71 y 72:

Figura 71. Actualización del conjunto de datos 'datatfm_dataset'

datatfm_dataset

SPICE Conjunto de datos 5.3 MB

Importación completada:
99% completado correctamente
Se importaron 57696 filas a SPICE
Se omitieron 210 filas
[Ver resumen de errores](#)

Última actualización: hace un minuto
[Ver historial](#)

[Actualizar ahora](#) [Programar una actualización](#)

Propietarios de correo electrónico cuando se produce un error en una actualización

Fuente: Elaboración propia

Figura 72. Trabajos de actualización automática programados en el conjunto de datos

Ver el historial de actualizaciones de datatfm_dataset

Hora de inicio dentro: Semana pasada Estado del trabajo de: Todo

Fecha de inicio (UTC)	Estado	Hora de finalización	Filas omitidas	Filas incorporadas	Filas del conjunto de datos	Trabajo de actualización
2022/07/01 18:00:00	Completado	25 segundos	180	47432	47432	Programado, Actualización completa
2022/07/01 17:00:00	Completado	25 segundos	174	47227	47227	Programado, Actualización completa
2022/07/01 15:59:27	Completado	21 segundos	174	47010	47010	Programado, Actualización completa
2022/07/01 14:59:27	Completado	22 segundos	174	46793	46793	Programado, Actualización completa
2022/07/01 13:59:27	Completado	23 segundos	174	46579	46579	Programado, Actualización completa
2022/07/01 12:59:27	Completado	21 segundos	174	46365	46365	Programado, Actualización completa
2022/07/01 11:59:27	Completado	22 segundos	174	46137	46137	Programado, Actualización completa

Tamaño de la página: 50

Atrás

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a lo mostrado en las figuras anteriores, el sistema actualiza la información proveniente del invernadero cada hora. Cabe anotar que el sistema reporta incluso los errores que se han generado en la ingesta de datos debido a la llegada de valores defectuosos, que producto de una decodificación no adecuada de datos en la recepción del gateway. Para el período de pruebas contemplado se recibieron aproximadamente 57696 registros de datos correctos y apenas 210 de los mismos fueron erróneos, por lo que el sistema tuvo una eficiencia de 99,63% aproximadamente.

Los errores reportados por el sistema pueden ser evidenciados en la Figura 73:

Figura 73. Errores en la ingesta de datos de AWS IoT Analytics

Resumen de errores

Resumen

Se han omitido 0.36% (210 filas) de un total de 57906 filas.

Filas omitidas

3 filas en las que no se pudieron interpretar los valores numéricos del campo **co2**.
 198 filas en las que no se pudieron interpretar los valores numéricos del campo **luminosidad**.
 9 filas en las que no se pudieron interpretar los valores numéricos del campo **temperatura**.

Solución de problemas

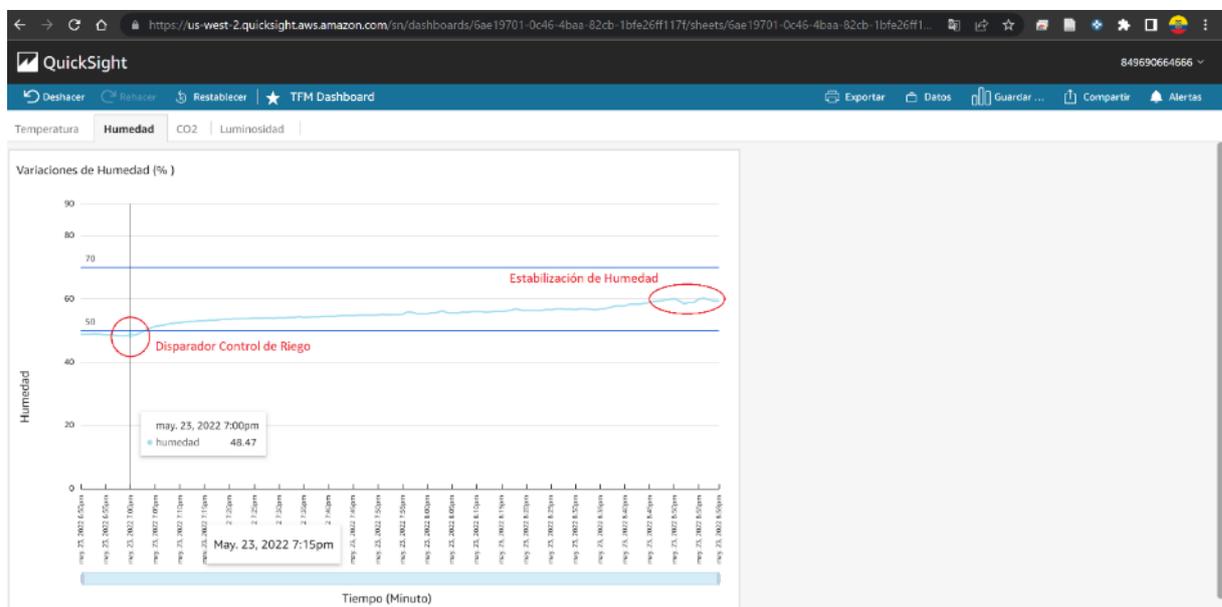
[Descargar el archivo de filas de error](#)

Fuente: Elaboración propia

4.5.3.2. Activación del control de riego automático

Durante el período de pruebas de observación del sistema, no fueron frecuentes los eventos de disparo del sistema de control de riego automático, debido fundamentalmente a la extensión del período de observación y a las condiciones controladas con las que se ejecutaron las pruebas, sin embargo, como puede verse en la Figura 74, se pudo capturar un evento en el cual la humedad relativa cae por debajo del umbral definido de 50% e inmediatamente acciona la bomba de agua, la cual riega el cultivo y se obtiene un incremento de humedad que se sostiene varias horas hasta alcanzar la estabilización en alrededor del 60%.

Figura 74. Disparador del Control de Riego Automático



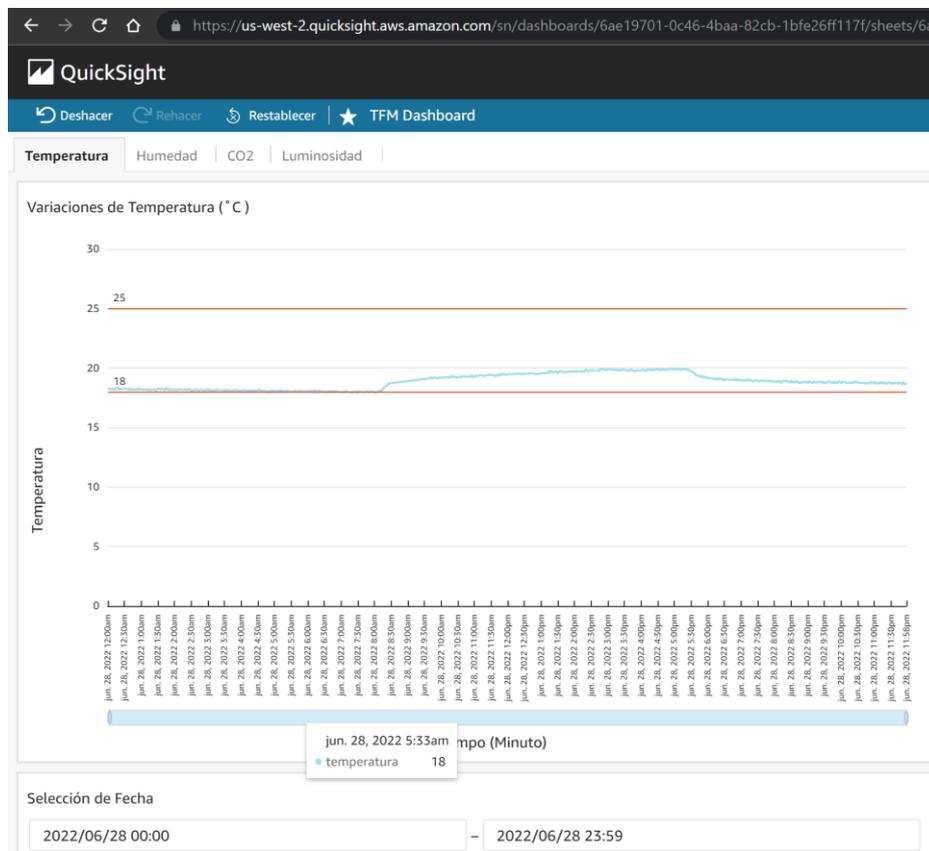
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a lo esperado, el sistema de control de riego funciona adecuadamente y se dispara de acuerdo a los valores umbrales de humedad definidos, haciendo que la bomba de agua conectada al dispositivo IoT se accione y canalice el agua del depósito del invernadero en la salida que conduce a la maceta de cultivo. Como puede apreciarse el cambio en la humedad no se da abruptamente y más bien tiende a crecer lentamente hasta alcanzar un límite de estabilización.

4.5.3.3. Actualización automática de los sistemas de visualización

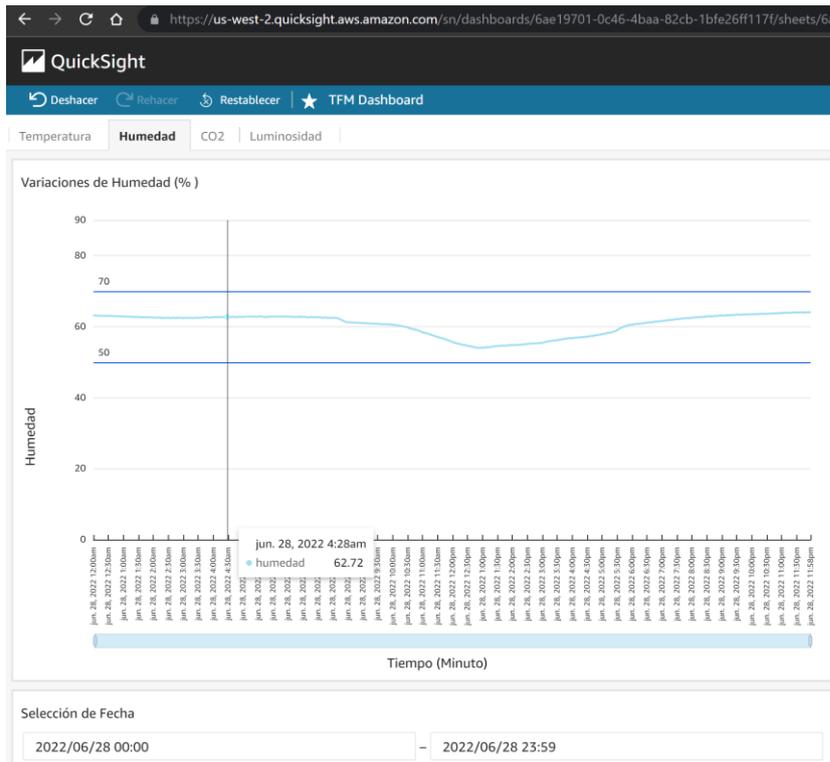
Una vez que se comprobó el correcto funcionamiento del sistema y su ingesta de datos en los módulos AWS IoT Core y AWS IoT Analytics, lo que se validó fue la correcta actualización de información en el dashboard de visualización desarrollado en Quicksight. Para efectos de pruebas, se escogió el 28/06/2022 como referencia temporal, con el fin de obtener los datos registrados de las variables climáticas del invernadero, cuyos resultados pueden apreciarse en las Figuras 75, 76, 77 y 78, mostradas a continuación:

Figura 75. Registros de Temperatura (28/06/2022)



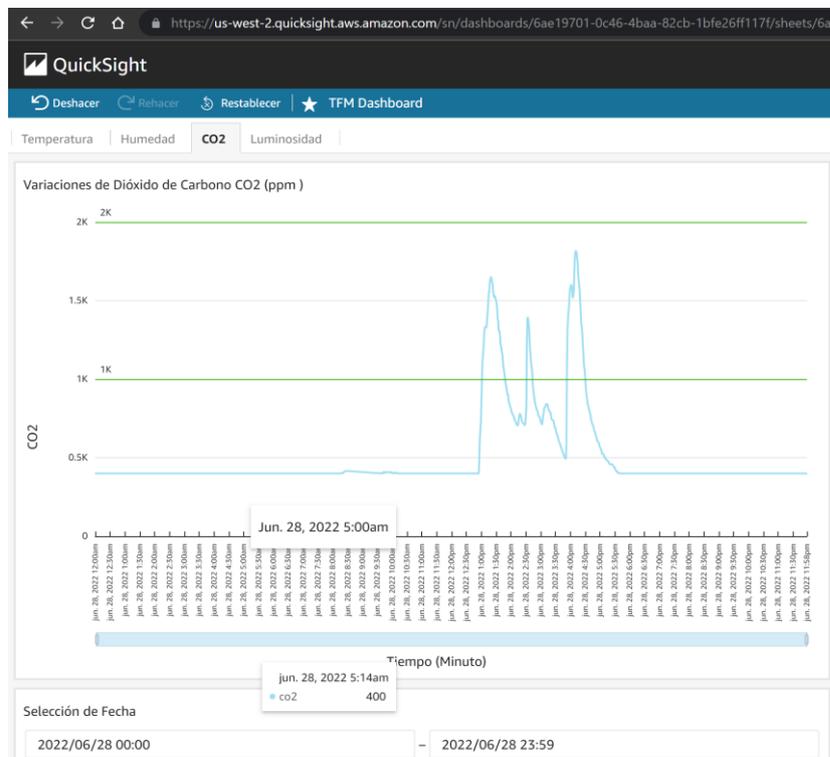
Fuente: Elaboración propia

Figura 76. Registros de Humedad (28/06/2022)

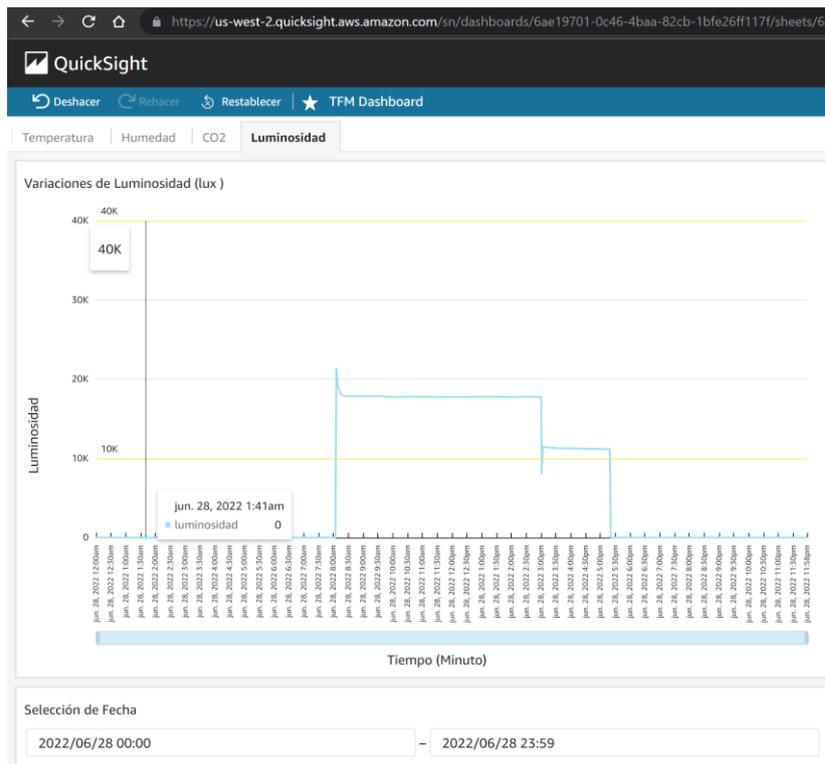


Fuente: Elaboración propia

Figura 77. Registros de Concentración de Dióxido de Carbono (28/06/2022)



Fuente: Elaboración propia

Figura 78. Registros de Luminosidad (28/06/2022)

Fuente: Elaboración propia

4.5.4. Observaciones

De los resultados mostrados en los apartados anteriores se desprenden las siguientes observaciones:

- El sistema diseñado e implementado en el presente trabajo presenta estabilidad durante el período de observación, la ingesta de datos se realiza correctamente y el almacenamiento de los mismos en los módulos de Amazon Web Services se realiza de acuerdo a lo esperado.
- El dashboard de visualización diseñado en QuickSight permite el consumo de los datos extraídos desde AWS IoT Analytics, y despliega la información de acuerdo a los filtros temporales configurados.
- El sistema de transmisión LoRa entre el dispositivo IoT y el gateway de comunicación presenta una eficiencia de 99,63%, lo cual garantiza que no se pierda la información proveniente del invernadero.
- El sistema de sensores y actuadores, en conjunto con el dispositivo IoT funcionaron adecuadamente, cumplieron su objetivo de realizar la adquisición de datos desde el

interior de la infraestructura de invernadero hasta la comunicación con el gateway, sin presentar problemas o inhibiciones inesperadas.

- El gateway de comunicación tuvo un comportamiento estable en el período de pruebas y permitió la ingesta de datos hacia AWS a través de comunicación inalámbrica Wi-Fi. Cabe destacar que el punto de acceso Wi-Fi tuvo ciertas intermitencias que pudieron observarse en las métricas de AWS IoT Core, sin embargo, no afectaron demasiado a los resultados globales.
- Respecto a las variables ambientales del invernadero, pudieron sensarse de manera adecuada y de acuerdo a la periodicidad definida en las lógicas de programación, aportando información detallada de la evolución de las mismas.
- Las variables de temperatura, humedad y luminosidad se mantuvieron en los límites ideales para el cultivo de tomate en el período de observación, sin embargo, la variable correspondiente a la concentración de dióxido de carbono mostró valores por debajo del umbral ideal, esto debido a que la pruebas no tomaron en cuenta la inclusión de generadores de CO₂, que son habituales en escenarios reales de invernadero.

4.5.5. Presupuesto y Planificación

Con el objeto de realizar el trabajo descrito a lo largo del presente documento, se optó por la elección de los materiales descritos en la Tabla 10, la misma que muestra los componentes usados, así como su costo referencial en dólares americanos (USD) y se puede ver a continuación:

Tabla 10. Costos de componentes

COMPONENTE	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	VALOR TOTAL
Microcontrolador M5GO	2	\$39,90	\$79,80
Módulo LoRa 868	2	\$16,95	\$33,90
Sensor de Temperatura y Humedad (ENV III)	1	\$6,95	\$6,95
Sensor de CO2 (TVOC/eCO2)	1	\$10,95	\$10,95
Sensor de Luminosidad (DLIGHT)	1	\$5,50	\$5,50
Bomba de Agua (WATERING PUMP)	1	\$11,50	\$11,50
Hub Puerto A (M5GO)	1	\$7,95	\$7,95
Baterías M5GO (500 mAh)	2	\$11,95	\$23,90
Invernadero Casero IKEA	1	\$44,83	\$44,83
Maceta	1	\$5,00	\$5,00
Semillas	1	\$4,00	\$4,00
TOTAL	14		\$234,28

Fuente: Elaboración propia

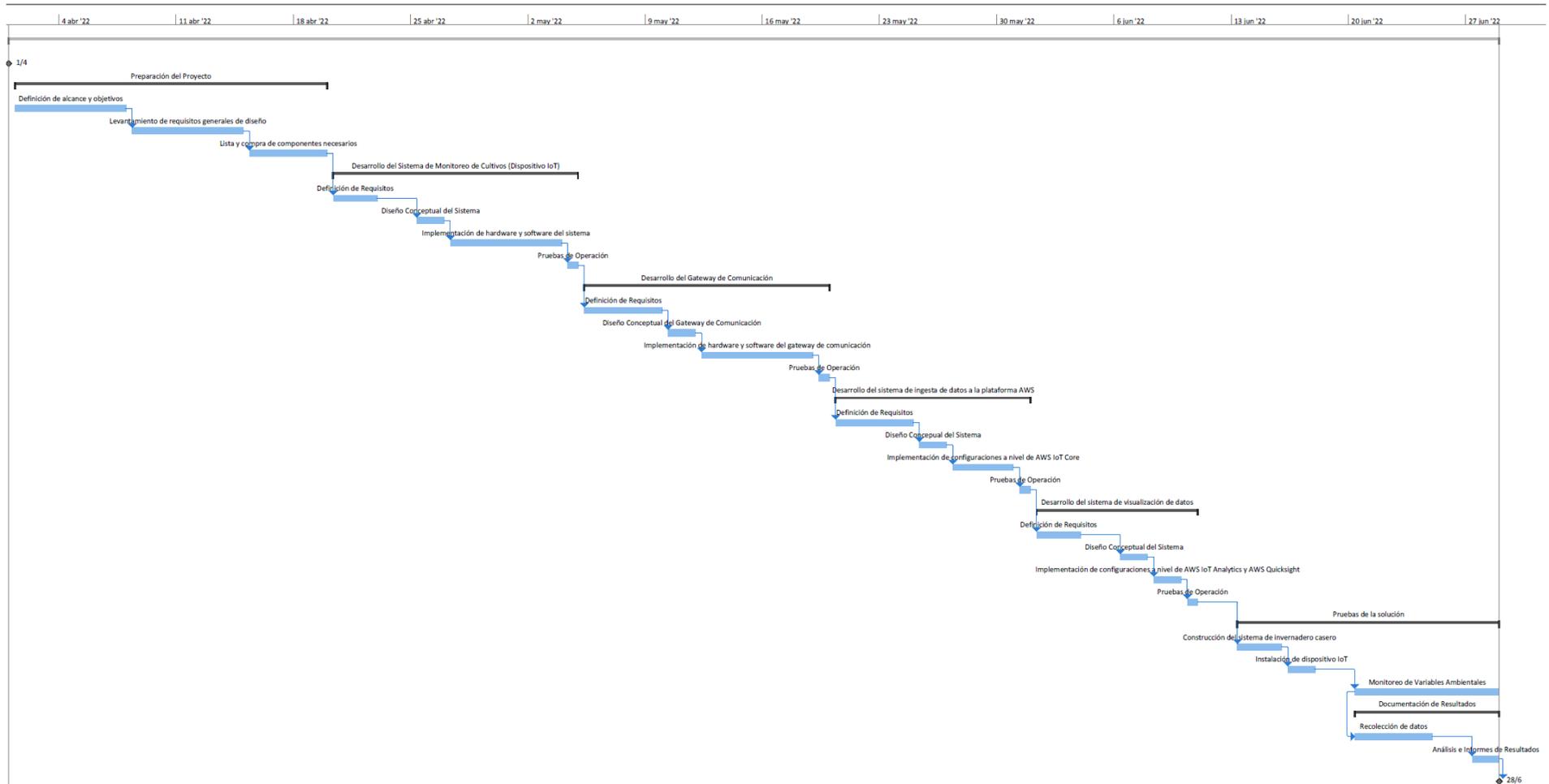
De acuerdo a la metodología de gestión de proyectos adoptada, la planificación referencial de actividades del proyecto puede esquematizarse en las Figuras 79 y 80 mostradas a continuación:

Figura 79. Planificación de Actividades

Id	Modo de tarea	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin
0		Diseño de Dispositivo y Arquitectura IoT para el control y monitoreo de cultivos	63 días	vie 1/4/22	mar 28/6/22
1		Inicio	0 días	vie 1/4/22	vie 1/4/22
2		Preparación del Proyecto	13 días	vie 1/4/22	mar 19/4/22
3		Definición de alcance y objetivos	5 días	vie 1/4/22	jue 7/4/22
4		Levantamiento de requisitos generales de diseño	5 días	vie 8/4/22	jue 14/4/22
5		Lista y compra de componentes necesarios	3 días	vie 15/4/22	mar 19/4/22
6		Desarrollo del Sistema de Monitoreo de Cultivos (Dispositivo IoT)	11 días	mié 20/4/22	mié 4/5/22
7		Definición de Requisitos	3 días	mié 20/4/22	vie 22/4/22
8		Diseño Conceptual del Sistema	2 días	lun 25/4/22	mar 26/4/22
9		Implementación de hardware y software del sistema	5 días	mié 27/4/22	mar 3/5/22
10		Pruebas de Operación	1 día	mié 4/5/22	mié 4/5/22
11		Desarrollo del Gateway de Comunicación	11 días	jue 5/5/22	jue 19/5/22
12		Definición de Requisitos	3 días	jue 5/5/22	lun 9/5/22
13		Diseño Conceptual del Gateway de Comunicación	2 días	mar 10/5/22	mié 11/5/22
14		Implementación de hardware y software del gateway de comunicación	5 días	jue 12/5/22	mié 18/5/22
15		Pruebas de Operación	1 día	jue 19/5/22	jue 19/5/22
16		Desarrollo del sistema de ingesta de datos a la plataforma AWS	8 días	vie 20/5/22	mar 31/5/22
17		Definición de Requisitos	3 días	vie 20/5/22	mar 24/5/22
18		Diseño Conceptual del Sistema	2 días	mié 25/5/22	jue 26/5/22
19		Implementación de configuraciones a nivel de AWS IoT Core	2 días	vie 27/5/22	lun 30/5/22
20		Pruebas de Operación	1 día	mar 31/5/22	mar 31/5/22
21		Desarrollo del sistema de visualización de datos	8 días	mié 1/6/22	vie 10/6/22
22		Definición de Requisitos	3 días	mié 1/6/22	vie 3/6/22
23		Diseño Conceptual del Sistema	2 días	lun 6/6/22	mar 7/6/22
24		Implementación de configuraciones a nivel de AWS IoT Analytics y AWS	2 días	mié 8/6/22	jue 9/6/22
25		Pruebas de Operación	1 día	vie 10/6/22	vie 10/6/22
26		Pruebas de la solución	12 días	lun 13/6/22	mar 28/6/22
27		Construcción del sistema de invernadero casero	3 días	lun 13/6/22	mié 15/6/22
28		Instalación de dispositivo IoT	2 días	jue 16/6/22	vie 17/6/22
29		Monitoreo de Variables Ambientales	7 días	lun 20/6/22	mar 28/6/22
30		Documentación de Resultados	7 días	lun 20/6/22	mar 28/6/22
31		Recolección de datos	5 días	lun 20/6/22	vie 24/6/22
32		Análisis e Informes de Resultados	2 días	lun 27/6/22	mar 28/6/22
33		Fin	0 días	mar 28/6/22	mar 28/6/22

Fuente: Elaboración propia

Figura 80. Diagrama de Gantt



Fuente: Elaboración Propia

5. Conclusiones y trabajos futuros

El objetivo principal que tiene este capítulo es contrastar los objetivos planteados en el capítulo 3 con los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en el capítulo 4, también se detallarán las contribuciones que tiene el presente trabajo con el fin de plantear posibles líneas de investigación en trabajos futuros, mencionando además las oportunidades de mejora identificadas.

5.1. ANÁLISIS DE OBJETIVOS

El primer objetivo específico trata sobre el diseño de un prototipo de dispositivo IoT en base al uso de microcontroladores, sensores y actuadores para el control y monitoreo de cultivos, el mismo que fue cubierto en el capítulo 4 numeral 4.1, donde se describe el diseño implementado en base al uso del microcontrolador M5GO, los sensores ENV8, TVOC/eCO₂, DLIGHT y el actuador WATERING PUMP. Se detalló la implementación de hardware a nivel de conexiones físicas y puertos utilizados, así como también la implementación lógica a nivel de programación mostrando finalmente su funcionamiento a través de la pantalla LCD del microcontrolador.

El segundo objetivo específico abarca la implementación de un sistema de transmisión de datos basado en comunicación LoRa que permita el envío de información entre el dispositivo IoT y el gateway de comunicación. Este objetivo se cumplió acorde a lo descrito en el capítulo 4 numeral 4.1, donde se detalla el uso del módulo LoRa 868 del fabricante M5Stack en conjunto con el microcontrolador M5GO, especificando las conexiones físicas a nivel de puertos GPIO, la banda de operación en 915 MHz y explicando las lógicas de programación para inicializar el módulo, empaquetar los datos y transmitirlos hacia el gateway.

El tercer objetivo específico tiene que ver con el diseño y la implementación de un gateway LoRa basado en el uso de microcontroladores que posibiliten la transmisión de datos a plataformas de Cloud Computing usando el protocolo MQTT. La validación de este objetivo fue abordada en el capítulo 4 numeral 4.2, donde se mostró la solución planteada a nivel de hardware con el uso del microcontrolador M5GO y el módulo LoRa 868, detallando sus conexiones físicas y describiendo la lógica de programación para recibir los datos vía LoRa,

organizarlos y transformarlos en strings JSON para su envío hacia el módulo AWS IoT Core por medio del protocolo MQTT, usando para esto comunicación inalámbrica Wi-Fi.

El cuarto objetivo específico trata de la implementación de políticas del lado de la plataforma de Cloud Computing seleccionada que permitan la ingesta de datos provenientes del gateway de comunicación. Este objetivo fue profundizado en el capítulo 4 numeral 4.3, donde se muestran todas las configuraciones realizadas en el módulo IoT Core de la plataforma AWS para el aprovisionamiento del gateway como objeto dentro de AWS, detallando las reglas creadas para la ingesta de datos y las políticas de seguridad aplicadas en la conexión entre el dispositivo IoT y AWS IoT Core por medio de certificados digitales.

El quinto objetivo específico considera la implementación de un sistema de visualización de datos que permita mostrar la información proveniente de los cultivos hacia los usuarios finales. Este objetivo fue tratado en el capítulo 4 numeral 4.4, donde se detallaron todas las reglas establecidas en el módulo AWS IoT Core con el fin de redireccionar los datos provenientes del gateway hacia el módulo AWS IoT Analytics, donde finalmente son almacenados para su posterior consumo. Adicionalmente se muestran los criterios seguidos para la creación de los conjuntos de datos con los cuales se diseñó el dashboard de visualización a través de la herramienta AWS Quicksight.

En virtud de lo expuesto anteriormente, se puede validar el cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos planteados, por consiguiente el objetivo general fue cubierto en su totalidad, dado a que se diseñó e implementó un prototipo a pequeña escala de arquitectura y dispositivo IoT que posibilita el control y monitorización de cultivos de tomate riñón en zonas geográficas remotas, trabajo que puede servir como punto de partida y referencia para implementaciones de mayor calado en los campos de Industria 4.0, Internet de las Cosas, Ingeniería y ramas afines.

5.2.CONCLUSIONES

El presente trabajo fue realizado con el objeto de mostrar una alternativa de solución a la transformación digital de la gestión de cultivos de tomate riñón en zonas geográficas remotas, como un aporte referencial tendiente a la mejora de los procesos inmersos en este tipo de cultivos y a la obtención de productos alimentarios de mejor calidad. Sobre la base del

desarrollo expuesto a lo largo de este proyecto, se han extraído las conclusiones mostradas a continuación:

- Las variables climáticas indispensables para el cultivo y producción de tomate riñón en sistemas de invernadero a pequeña escala son la temperatura, la humedad, la concentración de dióxido de carbono y la luz ambiente.
- El uso de soluciones de Internet de las Cosas (IoT) en la rama de la agricultura, permite realizar el control y monitoreo de todo tipo de cultivos, posibilitando la obtención de datos que una vez procesados aportan en el mejoramiento de los procesos inherentes al cultivo y producción agrícola.
- Los sistemas de invernadero son infraestructuras que facilitan la creación de microclimas muy estables en su interior, sin importar las condiciones climáticas exteriores, sin embargo, se hace necesario implementar mecanismos tecnológicos automatizados para optimizar y estabilizar el comportamiento de las variables ambientales internas.
- Una de las problemáticas más comunes en el Ecuador en referencia a la producción agrícola, es la ubicación geográfica remota de los cultivos, la cual impide la tecnificación de los procesos dada la dificultad de obtener datos de los cultivos al no existir sistemas de comunicación que faciliten su implementación.
- LoRa es un sistema de comunicación abierto de largo alcance y bajo consumo de potencia que se está convirtiendo en una solución palpable de telemetría para la transmisión de datos en zonas que no disponen de cobertura de sistemas fijos o móviles comerciales convencionales.
- Del trabajo realizado con los microcontroladores M5GO del fabricante M5Stack podemos concluir que son una opción relativamente barata para el prototipado rápido de soluciones IoT, son altamente flexibles y compatibles con sensores y módulos de comunicación orientados a soluciones de internet de las cosas. También presentan opciones de programación del tipo blocky (UIFlow) que facilitan la construcción de lógicas de operación a nivel de software.
- La plataforma Amazon Web Services, elegida como parte integral de la solución planteada en el presente proyecto, ofrece un amplio conjunto de recursos para el manejo de soluciones IoT. Dada la escala en la que fue implementada la solución se

usó la suscripción gratuita de AWS con resultados satisfactorios, debido principalmente a la cantidad de documentación guía existente en la web de Amazon.

- El uso del módulo AWS IoT Core fue de gran ayuda en el aprovisionamiento del gateway implementado y le dió una capa de seguridad al proyecto debido a que el establecimiento de conexión del Gateway con AWS se realizó a través de certificados digitales obtenidos en la fase de creación del gateway como objeto en AWS.
- De los diversos módulos de almacenamiento en bases de datos existentes dentro de la plataforma AWS (Amazon S3, Dynamo DB, Amazon RDS, etc) se escogió a AWS IoT Analytics debido a su capacidad para filtrar, transformar y enriquecer los datos provenientes de reglas en AWS IoT Core, lo que facilitó la creación de series temporales de datos con las variables ambientales capturadas en los cultivos.
- La herramienta AWS Quicksight aportó mucha sencillez a la hora del diseño del sistema de visualización debido al manejo simple de los conjuntos de datos y a las opciones intuitivas de visualización en gráficas de línea temporal.
- De acuerdo a todo lo plasmado en el presente trabajo, se han implementado en cierta medida todos los aspectos de una arquitectura IoT de referencia, permitiendo conocer a pequeña escala todos los elementos fundamentales de una solución de internet de las cosas, integrando de esta manera todos los conocimientos adquiridos en el máster.

5.3.OPORTUNIDADES DE MEJORA Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS

A continuación, se plantean líneas de investigación y desarrollo futuras alineadas al tema propuesto en el presente proyecto a manera de complemento y oportunidades de mejora identificadas en el mismo:

- Originalmente el sistema propuesto se basa en el monitoreo de parámetros ambientales favorables para el cultivo de tomate riñón, sin embargo, la implementación podría ampliarse para una gran variedad de cultivos dando un campo amplio de aplicabilidad al proyecto.
- Debido a la implementación a pequeña escala realizada en este proyecto, un desarrollo futuro del mismo podría ser la puesta en funcionamiento del sistema en infraestructuras de invernadero industriales, que cuenten con múltiples dispositivos IoT difundidos en diferentes parcelas y se integren con sistemas de control de riego, generadores de CO₂ y mecanismos de apertura/cierre de ventoleras.

- Tal como fue concebido el presente trabajo, el dispositivo IoT implementado envía los datos unidireccionalmente hacia el gateway de comunicación y posteriormente hacia la plataforma de Cloud Computing, sin embargo, no existen lógicas implementadas del lado de AWS para responder automáticamente a eventos en función de los datos recibidos. Justamente esta podría ser una nueva línea de investigación futura, dado que se podría mejorar el proyecto dándole un componente autónomo más elevado, integrando lógicas en AWS que respondan a eventos a partir de procesos de analítica o aprendizaje automático de datos con el fin de controlar los cultivos sin la necesidad de supervisión humana.
- Dado a que la alimentación energética de los componentes electrónicos del presente proyecto fue realizada a través de baterías, una mejora a esto podría darse con la inclusión en la solución de mecanismos de celdas solares que permitan dar una mejor autonomía al sistema y la capacidad de desplegarse en zonas geográficas que no cuenten con fuentes energéticas convencionales.
- Para dar un mejor rendimiento en el consumo energético del sistema, se podrían implementar a nivel de software lógicas para reducir los tiempos de encendido de la pantalla LCD de visualización de datos e incluso la deshabilitación de los módulos de comunicación, lo que podría elevar en gran medida el rendimiento original.
- Dado que la solución propuesta se basa en la adquisición de información referente a las condiciones climáticas de un cultivo, podría abrirse una línea futura de trabajo que contemple el uso de esta solución en el reconocimiento previo de terrenos aptos para el cultivo. Esto, sumado a las alternativas de energía solar propuestas como mejora, permitiría usar al modelo como un sistema de estudio de suelos en zonas geográficas remotas que ayudaría al mejor aprovechamiento de terrenos de cultivo y a la creación de patrones climáticos útiles para la toma de decisiones en los procesos de producción agrícola.
- Finalmente, y basados en la arquitectura de referencia IoT utilizada en el presente trabajo, se podrían crear otras versiones del sistema, mediante la implementación de hardware Arduino, Atmel, PIC, etc, así como también el uso de otras plataformas de Cloud Computing como Azure, Google Cloud, etc, lo que posibilitará crear soluciones de acuerdo a necesidades específicas e incluso bajar los costos de implementación.

Referencias bibliográficas

- Asociación de Agrónomos Indígenas de Cañar. (2003). *El cultivo de tomate riñón en invernadero*. Abya Yala.
https://digitalrepository.unm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1366&context=abya_yala#:~:text=El%20tomate%20ri%C3%B1%C3%B3n%20es%20uno,actual%20de%20las%20familias%20campesinas.
- Baltazar-Aguilar, J., Enciso-Hernández, D., & Vargas-Domínguez, M. A. (2014). *Diseño e implementación de un dispositivo digital para el control de temperatura en un invernadero de tomate* [Tesis de Pregrado, Instituto Politécnico Nacional].
<https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/14251/TESIS%20ESIME%20PDF.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Beltrán-Pardo, M. & Sevillano-Jaén, F. (2013). *Cloud Computing, tecnología y negocio*. Ediciones Paraninfo, S.A.
- Caiza-Chimarro, J. C. (2016). *Diseño e implementación de un prototipo de sistema de control, supervisión de temperatura y humedad, para cultivos caseros bajo invernadero, utilizando el módulo Arduino, en la ciudad de Cayambe* [Tesis de Pregrado].
<http://repositorio.uisrael.edu.ec/bitstream/47000/1177/1/UISRAEL-EC-ELDT-378.242-24.pdf>
- Cevallos Gutiérrez, K. J. (2018). *Evaluación y selección de cultivares híbridos de tomate [Solanum lycopersicum L. (MILL.)] en la zona de Puerto la Boca, Manabí* [Tesis de Pregrado, Universidad Estatal del Sur de Manabí].
<http://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/1382/1/UNESUM-ECUA-ING.AGROPE-2018-24.pdf>

Dlight Unit—Ambient Light Sensor (BH1750FVI-TR). (2021). m5stack-store.

<https://shop.m5stack.com/products/dlight-unit-ambient-light-sensor-bh1750fvi-tr>

ENV III Unit with Temperature Humidity Air Pressure Sensor (SHT30+QMP6988). (2021).

m5stack-store. <https://shop.m5stack.com/products/env-iii-unit-with-temperature-humidity-air-pressure-sensor-sht30-qmp6988>

Gehlot, A., Sharma, R. K., Singh, R., & Sharma, K. K. (2020). *LoRa and IoT Networks for Applications in Industry 4.0*. Nova Science Publishers, Incorporated.

Heredia-Rivadeneira, A. E. & Lucero-Andrade, P. F. (2021). *Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores con tecnología LoRa para monitoreo industrial orientado a OPC de arquitectura unificada* [Tesis de Pregrado].

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/35875/1/Trabajo%20de%20Titulaci%3b3n.pdf>

Hillar, G. C. (2017). *MQTT Essentials—A Lightweight IoT Protocol*. Packt Publishing Ltd.

Jaramillo-Andrade, J. F. (2015). *Evaluación agronómica del cultivo de tomate (Solanum lycopersicum) bajo tres diferentes coberturas plásticas* [Tesis de Pregrado, Universidad San Francisco de Quito].

<https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/5339/1/122917.pdf>

López-Marín, L. M. (2016). *Manual Técnico del Cultivo del Tomate*. Inta.

<https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-10921.pdf>

M5Stack. (2021a). *LoRa Module(868MHz)*. m5stack-store.

<https://shop.m5stack.com/products/lora-module-868mhz>

M5Stack. (2021b). *M5GO IoT Starter Kit V2.6*. m5stack-store.

<https://shop.m5stack.com/products/m5go-iot-starter-kit-v2-6>

M5Stack. (2021c). *Watering Unit with Moisture Sensor and Pump*. m5stack-store.

<https://shop.m5stack.com/products/watering-unit-with-moisture-sensor-and-pump>

Serrano-Cermeño, Z. (2005). *Construcción de invernaderos* (Tercera Edición). Mundi-Prensa Libros.

TVOC/eCO2 Gas Sensor Unit (SGP30). (2021). m5stack-store.

<https://shop.m5stack.com/products/tvoc-eco2-gas-unit-sgp30>

Vega, A. M. (2017). *Manejo y mantenimiento de invernaderos*. Mundi-Prensa Libros.

Anexo A. Código Implementado

Código Dispositivo IoT

```

from m5stack import *
from m5ui import *
from uiflow import *
import module

import time
import unit

setScreenColor(0x222222)
env3_5 = unit.get(unit.ENV3, unit.PAHUB0)
tvoc_0 = unit.get(unit.TVOC, unit.PAHUB2)
dlight_0 = unit.get(unit.DLIGHT, unit.PAHUB1)

sensorT = None
Temperatura = None
sensorH = None
Humedad = None
sensorC = None
CO2 = None
sensorL = None
Luminosidad = None
pack = None

lora = module.get(module.LORA868)
lora = module.get(module.LORA433)

label3 = M5TextBox(0, 50, "Temperatura (grados):", lcd.FONT_Default, 0xFFFFFFFF,
rotate=0)
label4 = M5TextBox(0, 75, "Humedad (%):", lcd.FONT_Default, 0xFFFFFFFF,
rotate=0)
label5 = M5TextBox(0, 99, "CO2 (ppm):", lcd.FONT_Default, 0xFFFFFFFF, rotate=0)
label6 = M5TextBox(85, 99, "N/A", lcd.FONT_Default, 0xFFFFFFFF, rotate=0)
label7 = M5TextBox(0, 123, "Luminosidad (lux):", lcd.FONT_Default, 0xFFFFFFFF,
rotate=0)
label8 = M5TextBox(133, 123, "N/A", lcd.FONT_Default, 0xFFFFFFFF, rotate=0)
circle0 = M5Circle(223, 57, 8, 0xFFFFFFFF, 0xFFFFFFFF)
circle1 = M5Circle(223, 82, 8, 0xFFFFFFFF, 0xFFFFFFFF)
circle2 = M5Circle(223, 106, 8, 0xFFFFFFFF, 0xFFFFFFFF)
circle3 = M5Circle(223, 130, 8, 0xFFFFFFFF, 0xFFFFFFFF)
title0 = M5Title(title="Monitoreo LoRa TFM", x=3, fgcolor=0xFFFFFFFF,
bgcolor=0x0000FF)
label0 = M5TextBox(164, 50, "N/A", lcd.FONT_Default, 0xFFFFFFFF, rotate=0)

```

```

label9 = M5TextBox(0, 22, "Variables Invernadero", lcd.FONT_Default, 0xc07979,
rotate=0)
label11 = M5TextBox(102, 75, "N/A", lcd.FONT_Default, 0xFFFFFFFF, rotate=0)
label10 = M5TextBox(200, 21, "Status", lcd.FONT_Default, 0xc07979, rotate=0)
label12 = M5TextBox(0, 229, "LoRa Payload", lcd.FONT_DefaultSmall, 0xFFFFFFFF,
rotate=0)
image0 = M5Img(258, 198, "res/LoRa.jpg", True)
label13 = M5TextBox(270, 21, "Riego", lcd.FONT_Default, 0xc07979, rotate=0)
label111 = M5TextBox(0, 192, "Enviando Payload LoRa...", lcd.FONT_Default,
0xFFFFFFFF, rotate=0)
circle4 = M5Circle(289, 90, 15, 0xFFFFFFFF, 0xFFFFFFFF)
label12 = M5TextBox(0, 192, "Payload LoRa enviado...", lcd.FONT_Default,
0xFFFFFFFF, rotate=0)
label14 = M5TextBox(255, 55, "N/A", lcd.FONT_DefaultSmall, 0xFFFFFFFF, rotate=0)
label15 = M5TextBox(255, 118, "N/A", lcd.FONT_DefaultSmall, 0xFFFFFFFF,
rotate=0)

label111.hide()
label12.hide()
label14.hide()
label15.hide()
lora.lora_init(cs=5, rst=26, irq=36)
lora.config_lora(freq=915000000, band=125000, TxPow=17, sync=0x34,
spreadfactor=7, crate=5, preamble=8, CRC=False)
label0.setColor(0xff0000)
label1.setColor(0x3366ff)
label6.setColor(0xff6600)
label8.setColor(0xffff33)
while True:
    sensorT = float((env3_5.temperature))
    if sensorT >= 18 and sensorT <= 25:
        circle0.setBgColor(0x33cc00)
    else:
        circle0.setBgColor(0xff0000)
    Temperatura = "%.2f"%(sensorT)
    label0.setText(str(Temperatura))
    sensorH = float((env3_5.humidity))
    if sensorH >= 50 and sensorH <= 70:
        circle1.setBgColor(0x33cc00)
        circle4.setBgColor(0x33cc00)
        label14.show()
        label14.setText('Correcto')
        label15.hide()
    else:
        circle1.setBgColor(0xff0000)
        circle4.setBgColor(0xff0000)

```

```

label15.show()
label14.hide()
label15.setText('En proceso')
wait(1)
Humedad = "%.2f"%(sensorH)
label11.setText(str(Humedad))
sensorC = float((tvoc_0.eCO2))
if sensorC >= 1000 and sensorC <= 2000:
    circle2.setBgColor(0x33cc00)
else:
    circle2.setBgColor(0xff0000)
CO2 = "%.0f"%(sensorC)
label6.setText(str(CO2))
sensorL = float((dlight_0.get_lux()))
if sensorL >= 10000 and sensorL <= 40000:
    circle3.setBgColor(0x33cc00)
else:
    circle3.setBgColor(0xff0000)
Luminosidad = "%.0f"%(sensorL)
label8.setText(str(Luminosidad))
pack = [Temperatura, Humedad, CO2, Luminosidad]
for count in range(3):
    label11.show()
    wait_ms(500)
    label11.hide()
    wait_ms(500)
lora.begin_packet()
lora.println(str(pack))
lora.end_packet()
for count2 in range(1):
    label12.show()
    label2.setText(str(str(pack)))
    wait(10)
    label12.hide()
wait(60)
wait_ms(2)

```

Código Gateway

```

from m5stack import *
from m5ui import *
from uiflow import *
import module

import wifiCfg
import time
from IoTcloud.AWS import AWS
import json

```

```

setScreenColor(0x222222)

packet_size = None
check = None
lista = None
temperatura = None
humedad = None
co2 = None
luminosidad = None
temperaturaF = None
humedadF = None
co2F = None
luminosidadF = None

lora = module.get(module.LORA868)
lora = module.get(module.LORA433)
wifiCfg.doConnect('OYUKY_NETLIFE', '*Oyuleclyan2020*')

label0 = M5TextBox(0, 229, "RX LoRa Payload", lcd.FONT_DefaultSmall, 0xFFFFFFFF,
rotate=0)
label3 = M5TextBox(0, 28, "Estableciendo conexion Wi-Fi...", lcd.FONT_Default,
0xFFFFFFFF, rotate=0)
label1 = M5TextBox(166, 66, "N/A", lcd.FONT_Default, 0xFFFFFFFF, rotate=0)
title0 = M5Title(title="GATEWAY LoRa TFM", x=3, fgcolor=0xFFFFFFFF,
bgcolor=0x0000FF)
label2 = M5TextBox(105, 89, "N/A", lcd.FONT_Default, 0xFFFFFFFF, rotate=0)
label4 = M5TextBox(0, 27, "Status Wi-Fi:", lcd.FONT_Default, 0xFFFFFFFF,
rotate=0)
label5 = M5TextBox(96, 27, "CONECTADO", lcd.FONT_Default, 0xFFFFFFFF, rotate=0)
label6 = M5TextBox(0, 66, "Temperatura (grados):", lcd.FONT_Default, 0xFFFFFFFF,
rotate=0)
label7 = M5TextBox(0, 89, "Humedad (%):", lcd.FONT_Default, 0xFFFFFFFF,
rotate=0)
label8 = M5TextBox(0, 112, "CO2 (ppm):", lcd.FONT_Default, 0xFFFFFFFF, rotate=0)
label9 = M5TextBox(0, 135, "Luminosidad (lux):", lcd.FONT_Default, 0xFFFFFFFF,
rotate=0)
label10 = M5TextBox(83, 113, "N/A", lcd.FONT_Default, 0xFFFFFFFF, rotate=0)
label11 = M5TextBox(131, 135, "N/A", lcd.FONT_Default, 0xFFFFFFFF, rotate=0)
image0 = M5Img(258, 198, "res/LoRa.jpg", True)

def lora868_callback(lora, size):
    global packet_size, check, lista, temperatura, humedad, co2, luminosidad,
temperaturaF, humedadF, co2F, luminosidadF
    packet_size = size

```

