

Diseño de un sistema SCADA basado en IIoT aplicado a un vivero de propagación de plantas

Angel Mauricio Ardila Barba, Gilbert Joaquín Delgado López

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Electrónico

Director

Juan Manuel Rey López

Doctor en Ingeniería Electrónica

Codirector

Alejandro Ortiz Suarez

Ingeniero Electrónico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físico mecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Yo, Angel Mauricio Ardila Barba, le dedico no este trabajo sino mi carrera como estudiante y profesional a mi mamá, persona que sin lugar a duda me brindó las mejores oportunidades, y que me ha apoyado y lo seguirá haciendo en todas las decisiones.

De la misma manera se lo dedico a mis nonos que si bien ya no están acá lo siguen estando en realidad.

Yo, Gilbert Joaquín Delgado López, dedico toda mi vida a aquella persona que me trajo al mundo. La cual siempre quiso lo mejor para mí, aunque ella no recibió lo mejor de la vida. Sea el Dios en que ella y yo creemos, perfeccionándonos hasta el día ya dispuesto.

Dedico mi carrera a mi segunda madre, mi hermana que, aunque cada vez nos separe más la distancia y los quehaceres de la vida, nunca olvidaré todo lo que me enseñó de pequeño. Según para ella arrebatando mi infancia, pero según para mí un obsequio en años a lo que el ciclo de la vida confiere.

Dedico el título a mi padre, porque siempre he dicho que mi inteligencia nace del ajedrez. Sin ese pensamiento crítico que me fue enseñado desde muy temprana edad, no estaría donde estoy ahora.

Agradecimientos

Yo, Angel Mauricio Ardila Barba, le agradezco al profesor Jaime Guillermo Barrero Pérez por entender que la universidad va más allá de un salón de clase, y permitirme vivir la experiencia más importante en mi vida profesional y personal hasta el día de hoy.

De igual forma, agradezco a Liza María Martínez Zúñiga, por haber sido no solo mi soporte y compañera de vida en todo momento desde 2020 hasta el momento de entrega de este libro sino por demostrarme lo mucho que una persona puede cambiar para bien la vida de otra.

A Dios por sus maravillosas oportunidades que me ha brindado y a cada una de las personas que me ayudó de cualquier manera o creyó en mí les agradezco infinitamente y lo recordaré siempre.

Yo, Gilbert Joaquín Delgado López, primeramente, doy gracias al Dios vivo, incondicional. Fue el que me acompañó en mis peores desgracias y aun así me mantuvo con vida hasta este momento. Definitivamente, todo se lo debo a Él.

Agradezco a todas las personas que me acompañaron estos 5 años, que no tengo necesidad de nombrar pues ya saben el lugar que se han ganado en mi corazón. Ayudando con tantas alegrías que hacían olvidar mis problemas y aflicciones.

Gracias a aquellos profesores amables y estrictos, que forjaron a ese joven de 15 años entrando por primera vez a un extenso mundo de mal y bien.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Objetivos.....	17
1.1 Objetivo General.....	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. Desarrollo.....	18
2.1 Marco teórico.....	19
2.1.1 Aplicaciones relacionadas.....	19
2.1.2 Viveros y el control de humedad en sustrato.....	22
2.1.2.1 Afectación de humedad en la propagación de plantas.....	22
2.1.2.2 Viveros.....	23
2.1.2.2.1 Importancia de los viveros.....	23
2.1.2.2.2 Tipos de viveros.....	23
2.1.2.2.3 Sistemas de control en los viveros.....	23
2.1.3 IoT e IIoT.....	24
2.1.3.1 IoT.....	24
2.1.3.2 IIoT.....	25
2.1.3.3 Relación con Industria 4.0 y comparación.....	26
2.1.4 Sistemas SCADA.....	27
2.1.4.1 Componentes de los sistemas SCADA.....	27
2.1.4.2 Arquitecturas de sistemas SCADA.....	28
2.1.4.2.1 Monolítica.....	28

2.1.4.2.2 Distribuida.....	28
2.1.4.2.3 En Red.....	29
2.1.4.2.4 IoT.....	30
2.1.4.3 Impacto de los sistemas SCADA.....	30
2.1.5 Comunicación en redes industriales.....	31
2.2 Método.....	31
2.2.1 Caracterización del caso de estudio.....	32
2.2.2 Selección de componentes y rutina de control.....	33
2.2.2.1 Rutina de control.....	33
2.2.2.2 Selección del sistema SCADA.....	34
2.2.2.3 Selección de la arquitectura.....	35
2.2.2.3.1 Ventajas de IoT vs en Red.....	35
2.2.2.3.2 Afinidad con Ignition.....	37
2.2.2.3.3 Selección del servidor MQTT.....	38
2.2.2.5 Relación entre componentes.....	39
2.2.2.6 Definición de hardware.....	39
2.2.2.6.1 RTU.....	39
2.2.2.6.2 Fuente de poder.....	42
2.2.2.6.3 Breaker.....	44
2.2.2.6.4 Caja general de protección (CGP).....	44
2.2.2.6.5 Sensores.....	45
2.2.2.6.6 Electroválvulas.....	46
2.2.2.6.7 Relés de interposición.....	48

2.2.2.7 Resumen de componentes seleccionados.....	49
2.2.3 Configuración del sistema de control	50
2.2.3.1 Flujo de información.....	50
2.2.3.2 Configuración de la RTU.....	51
2.2.3.2.1 Hardware:.....	51
2.2.3.2.2 Software:	53
2.2.3.3 Enlace MQTT	54
2.2.3.4 Distribución Espacial	54
2.2.3.5 Configuración del SCADA.....	56
2.2.3.5.1 Distribución gráfica	57
2.2.3.5.2 Configuración del Gateway:	58
2.2.3.5.3 Configuración de tags	59
2.2.3.5.4 Creación de ventanas:	61
2.3 Resultados.....	64
2.3.1 Resumen del diseño del sistema	64
2.3.2 Resultado de la interfaz HMI.....	66
3. Conclusiones	68
4. Recomendaciones	69
Referencias Bibliográficas	70
Apéndices.....	75

Lista de Tablas

Tabla 1 Comparativa entre el IoT y el IIoT	26
Tabla 2. Características técnicas RTU Opto22	41
Tabla 3 Listado de componentes seleccionados	49
Tabla 4. Widgets	62

Lista de Figuras

Figura 1. Propuesta IIoT	26
Figura 2. Arquitectura Monolítica	28
Figura 3. Arquitectura distribuida.....	29
Figura 4. Arquitectura en red	29
Figura 5. (1) Arquitectura de cuarta generación. (2) Ejemplo Arquitectura SCADA	30
Figura 6. Diagrama de la lógica de control.....	34
Figura 7. Arquitectura Ignition	37
Figura 8. Interacción entre dispositivos del sistema	39
Figura 9. (1) Groov RIO, (2) Groov EPIC	40
Figura 10. Entradas de tensión Groov EPIC	41
Figura 11. Fuente de poder Allen Bradley 1606-XLE120E	43
Figura 12. (1) Sensor de humedad en el sustrato. (2) Sensor de temperatura y humedad en el ambiente.....	46
Figura 13. Electroválvula U.S. Solid USS-ZSV	48
Figura 14. Relé de interposición 700-HLT1Z24 Allen Bradley	49
Figura 15. Flujo de información del sistema SCADA	51
Figura 16. Configuración de canales RTU	53
Figura 17. (1) Configuración de MQTT Sparkplug. (2) I/O Manage.....	54
Figura 18. Diagrama ejemplo Interfaz SCADA.	57
Figura 19. Apartado MQTT Engine Settings.....	58
Figura 20. Apartado Database Connections.....	59
Figura 21. Ejemplo de Reference tags	60

Figura 22. Tag Editor	60
Figura 23. Widget humedad.....	62
Figura 24. Tendencia humedad.....	62
Figura 25. Widget válvula.....	62
Figura 26. Widget Temperatura.....	62
Figura 27. Control humedad	62
Figura 28. Arquitectura diseñada.....	66
Figura 29. Vista general HMI.....	67
Figura 30. Datos ambientales HMI.....	67
Figura 31. Módulo individual HMI	67

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Informe caracterización caso de estudio.....	75
Apéndice B. Información plataformas SCADA	85
Apéndice C. Información relacionada a los sensores	88
Apéndice D. Plano distribución eléctrica control y potencia.....	91
Apéndice E. Configuración comunicación por MQTT.....	98
Apéndice F. Plano de distribución física del vivero	102

Glosario

Aspersión: en términos de agricultura la aspersión es un método de riego que permite al líquido llegar a las plantas en forma de lluvia focalizada.

Breaker: conocido también como disyuntor es un dispositivo de seguridad que actúa de manera automática cuando se cumplen condiciones como lo es cierta intensidad de corriente para cortar el paso de esta en el circuito.

Bróker: en un sistema de comunicaciones, el bróker es aquella entidad intermediaria que se encarga de administrar los mensajes de la red.

CPS: Sistemas Ciber Físicos (Cyber-Physical System) son aquellos sistemas que corresponden a un mecanismo controlado por algoritmos que establece la interacción entre el mundo físico y el digital.

Gateway: en español puerta de enlace. Corresponde al dispositivo que actúa como interfaz para poder realizar la conexión entre dos dispositivos.

HMI (Human-Machine Interface): es la interfaz de software responsable de presentar la información relevante relacionada al proceso de automatización asociado. A través de ésta es que el humano puede interactuar con la máquina fácilmente.

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport): protocolo de comunicación ligero que hace uso del concepto de publicación de contenido y suscripción a estos por medio de tags. Está enfocado para la seguridad y la optimización de ancho de banda.

Microaspersión: en la agricultura representa una variación del riego por aspersión donde en este caso se tiene un menor volumen de agua lanzada en gotas más pequeñas.

MTU (Master Terminal Unit): Unidad Terminal Maestra es el término que representa un sistema electrónico que recibe la información que viene de unidades remotas y que envía también para ejecutar acciones.

Nebulización: en la agricultura corresponde a un método de riego de plantas que se da en forma semejante a la neblina en la zona de interés con gotas de un tamaño aún menor a las presentes en la microaspersión.

PLC (Programmable Logic Controller): Computador Lógico Programable, es una computadora que por su robustez está enfocada directamente para abordar procesos industriales.

RTU (Remote Terminal Unit): dispositivo enfocado a la recepción y transmisión de señales en un entorno industrial, usualmente relacionados a un sistema SCADA. Dentro de la familia de las RTU se encuentran los PLC.

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition): usualmente presentado como software que permite realizar el control, supervisión y manejo de datos de un proceso. Es comúnmente asociado a procesos industriales.

Telemetría: transmisión de datos a un lugar distante respecto a donde se realizó la medición.

Tag: etiqueta. Elemento o entidad usada en Ignition para el almacenamiento y la organización de datos de diferentes tipos y formatos. Cada Tag tiene su propia configuración útil para desempeñar distintas labores como memoria, expresiones, alarmas entre otras.

UPS (Uninterruptible Power Supply): Dispositivo que cuenta con baterías y otros almacenadores de energía para proporcionar energía eléctrica durante un periodo limitado en caso de apagones.

Vivero: conjunto de instalaciones enfocadas a la agricultura en las cuales se mantienen las plantas previas a su estado adecuado de distribución.

Resumen

Título: Diseño de un sistema SCADA basado en IIoT aplicado a un vivero de propagación de plantas*

Autores: Angel Mauricio Ardila Barba, Gilbert Joaquín Delgado López**

Palabras Clave: SCADA, IIoT, HMI, Humedad, Vivero, MQTT, RTU.

Descripción: La humedad en el sustrato es un factor crucial en la propagación de plantas pues puede limitar su crecimiento. Si ésta se encuentra muy elevada puede generar hongos, y si está muy baja puede propiciar la presencia de bacterias (Liu et al., 2020), por ello controlar esta variable es una necesidad. En este documento se propone el diseño de una primera versión de un sistema SCADA basado en IIoT que permita automatizar el proceso de regado, mientras se abre la posibilidad de optimización gracias a una interfaz remota donde se pueda acceder a la información relacionada al vivero de propagación de plantas del grupo de investigación CENIVAM de la Universidad Industrial de Santander, Colombia. Este trabajo de grado se encuentra enmarcado dentro de un proyecto de maestría que busca desarrollar una plataforma IIoT de automatización para formar profesionales en la industria 4.0 donde este proyecto de grado constituye la primera etapa.

El diseño del sistema SCADA se plantea partiendo de una caracterización del caso de estudio, con una solución enmarcada dentro del IIoT, realizando la selección de la plataforma SCADA entre las presentes actualmente en la industria. En adición, se hace una sugerencia de selección de los otros componentes del sistema como la RTU, servidor MQTT, fuente de poder y los sensores. Posteriormente se realiza el desarrollo de la plataforma SCADA: tanto de la HMI para facilitar la supervisión, como de la configuración interna para garantizar el funcionamiento, así como también se realiza la configuración del servidor MQTT seleccionado. Se presenta de igual forma la configuración que debe tener la RTU con el objetivo de articular todo el sistema, con los respectivos planos de distribución física para el momento de implementar este diseño.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas Escuela de Ingeniería eléctrica electrónica y de telecomunicaciones.

Director: Juan Manuel Rey López Doctor en ingeniería electrónica. Codirector: Alejandro Ortiz Suarez

Abstract

Title: Design of a SCADA system based on IIoT applied to a plant propagation greenhouse*

Authors: Angel Mauricio Ardila Barba, Gilbert Joaquín Delgado López**

Key Words: SCADA, IIoT, HMI, Humidity, Greenhouse, MQTT, RTU

Description: The humidity in the substrate is a crucial factor in the propagation of plants as it can limit their growth. If it is too high, it can generate fungi, and if it is too low, it can promote the presence of bacteria (Liu et al., 2020) hence controlling the soil moisture is a necessity. This document proposes the design of a first version of a SCADA system based on IIoT. It allows the automation of the irrigation process, while opening the possibility of optimization thanks to a remote interface where information related to the greenhouse of plants propagation from the CENIVAM research group of the Industrial University of Santander, Colombia can be accessed. This design is framed within a master's project that seeks to develop an automation IIoT platform to train professionals in industry 4.0 where this undergraduate project establishes the first stage.

The design of the SCADA system is based on a characterization of the case study, developing a solution approach framed within the IIoT, with the selection of the SCADA platform among those currently present in the industry. In addition, a selection suggestion is made for the other system components, such as the RTU, MQTT server, power supply or the sensors. Subsequently, the development of the SCADA platform is carried out, both HMI to facilitate supervision and the internal configuration to guarantee the operation, as well as the configuration of the selected MQTT server. In the same way, the configuration that the RTU must have to articulate the entire system is presented, with the respective physical distribution plans for the implementation stage.

* Bachelor thesis

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Juan Manuel Rey López PhD in electronic engineering. Co-director: Alejandro Ortiz Suárez

Introducción

Con la llegada de la revolución industrial, el hombre tiene la creencia de que todo puede ser automatizado, aumentando así precisión y producción y disminuyendo el desgaste humano. Es gracias a esto como la agricultura también está pasando por una revolución a través de las nuevas tecnologías alrededor del mundo (Rose & Chilvers, 2018). Este cambio se le atribuye a la avalancha de innovación engendrada en los últimos años, pero sin dejar a un lado los grandes desafíos presentados por la creciente población humana (Sott et al., 2020). El presente trabajo busca la expansión de las nuevas tecnologías de la agricultura 4.0, con énfasis en los viveros o invernaderos que no constan de un notorio avance en términos tecnológicos y aún dependen completamente del actuar humano, dedicando tiempo a múltiples tareas, las cuales ser automatizadas a la vez que se reducen posibles fallos.

Los avances tecnológicos no son nuevos en la agricultura, las tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas (IoT), Computación en la Nube (Cloud Computing), la robótica o la Inteligencia Artificial (AI), tienen el potencial de cambiar los cultivos de manera irreconocible (Rose & Chilvers, 2018). De esta manera se busca recrear procesos con un pico de productividad que suplan la necesidad actual de recursos bióticos de la agricultura, fomentando ganancias significativas en eficiencia, productividad y uso sostenible de los recursos del ambiente (Pinto et al., 2021). En la actualidad existen ya varios estudios que contemplan el control de variables ambientales en invernaderos como la temperatura, el nivel de luz y la humedad del suelo, en donde se diseñan plataformas para la agricultura inteligente usando sensores y una variedad de algoritmos y técnicas de control

La agricultura de precisión no ha inundado completamente todos los sectores dedicados debido a que, en términos de costo, es más factible el recurso humano agricultor. Sin embargo, los estudios siguen avanzando y demostrando que, tanto para investigación como para comercio, nuevas técnicas deberían ser ejecutadas, puesto que permite mayor eficiencia y efectividad en el uso de los recursos, como el agua, fertilizantes y pesticidas. Esto puede significar un rendimiento más alto en los cultivos y mayores beneficios para los agricultores.

La información recopilada en el sistema por medio de los sensores se usa para tomar decisiones más precisas en acciones como definir cuándo regar, accionar ventilación o fertilizar, lo que puede ayudar a optimizar el crecimiento de los cultivos y reducir el desperdicio de recursos. Particularmente, en este trabajo se utiliza la agricultura de precisión para monitorear el nivel de humedad en el sustrato, mientras se monitorea la temperatura y humedad general en el ambiente de uno de los viveros asociados a un grupo de investigación en la Universidad Industrial de Santander, automatizando el proceso del sistema de riego de plantas en sus diferentes etapas de crecimiento.

En general, aplicar los avances de la agricultura de precisión a un vivero local puede ayudar a los agricultores a aumentar la producción de los cultivos con menos recursos y menos desperdicio mientras progresan las condiciones de crecimiento de las plantas, mejorando así mismo la calidad de trabajo del personal y de los productos a la vez que se reduce el impacto ambiental. La utilización del marco IIoT nace a partir del proyecto en que se anida este trabajo de grado: “Plataforma IIoT para formación de profesionales en tecnologías de la cuarta revolución industrial”. En dicho proyecto se contemplan múltiples casos de estudio donde la automatización del vivero abordado en este trabajo es uno de ellos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar un sistema SCADA para el vivero de propagación de plantas a cargo del grupo de investigación CENIVAM haciendo uso de arquitecturas y dispositivos característicos del IIoT que permitan automatizar los procesos de control, supervisión y mantenimiento.

1.2 Objetivos Específicos

- Establecer las necesidades y posibles adecuaciones del vivero.
- Definir la arquitectura del sistema SCADA orientado a la propagación de plantas.
- Seleccionar los dispositivos adecuados para cada etapa del sistema según sus requerimientos.
- Realizar los respectivos planos para las diferentes áreas del sistema.
- Configurar la plataforma a utilizar para poder realizar el monitoreo de variables de interés del sistema.

2. Desarrollo

En este capítulo se presentan los factores y aspectos que fueron resaltados como relevantes al realizar la etapa de revisión del estado de arte, encontrando conceptos relacionados a la automatización de procesos en viveros enfocados a la propagación de plantas y al control de humedad en el sustrato por medio de un sistema SCADA basado en IIoT. Posteriormente se presenta la metodología abordada y los resultados obtenidos en este proceso del diseño.

2.1 Marco teórico

Como primera medida, para tener un buen fundamento técnico, se llevó a cabo una revisión bibliográfica donde se contemplan documentos de trabajo de grado en las modalidades de pregrado, maestría y doctorado relacionados al área de interés de distintas universidades del país y del mundo, así como publicaciones científicas en revistas y libros indexadas en fuentes de gran renombre en la investigación dentro de las ciencias aplicadas. Así mismo se presenta una contextualización de la importancia de los viveros con un sistema de control de humedad para la propagación de plantas, y, por último, la composición e importancia de un sistema SCADA.

2.1.1 Aplicaciones relacionadas

Al abordar estos documentos se encontraron coincidencias entre distintas fuentes y algunas nuevas ideas que sirvieron como punto de partida para este proyecto. De igual forma se identificaron oportunidades presentes en los trabajos encontrados de las cuales algunas tienen relación con los objetivos enmarcados en este desarrollo. Ejemplos de estas referencias consultadas y algunas conclusiones se presentan a continuación:

Investigadores de Arabia Saudita y Argelia presentan en el estudio (Subahi & Bouazza, 2020) un proyecto en el cual diseñan un sistema para controlar y monitorear la temperatura en un invernadero ubicado en Arabia Saudita ya que en verano la temperatura ambiente ha llegado a superar los 50°C. En este estudio se usan redes de Petri (PN) en el modelo para lograr monitorear y generar una temperatura de referencia apropiada con un sistema eficiente, escalable y que hace uso de la información de los sensores para generar reportes. De forma similar, en el estudio

realizado por las universidades Nanchang y la Universidad Yiyang de China, se tiene el enfoque donde hacen uso de lógica difusa (Fuzzy Logic) para el control de temperatura logrando disminuir el tiempo de establecimiento y el sobre pico del sistema (Fei et al., 2021).

Con respecto a (José & Alvarado Ruiz, n.d.) optando por el grado de maestría en automatización industrial en la Universidad Nacional de Colombia, se realiza tanto el diseño como la implementación de un sistema de supervisión SCADA en la producción de un proceso de auto compostaje. El autor presenta un análisis de diferentes plataformas SCADA usadas en la industria con una comparación por medio de una matriz de decisión para seleccionar la opción que mejor se ajusta a las necesidades consensuadas con los interesados.

Autores asociados a la Universidad de Agricultura de Bogor proponen el desarrollo de un sistema de irrigación de plantas de Chile Cayeno (*Capsicum frutescens* L) haciendo uso de la medición de la humedad en el suelo enfocándose a la agricultura de precisión. Con un sistema donde solo se mide la humedad en el sustrato con el sensor YL-69 y la señal de control va dirigida a accionar una válvula de solenoide en un control ON/OFF, permitiendo el flujo de agua cuando la señal del sensor se encuentre bajo el umbral establecido de humedad, y cortando el paso de agua cuando éste se supere, siempre y cuando el microcontrolador Arduino Mega esté encendido. Se realizaron pruebas en 16 recipientes diferentes con diferentes valores iniciales de humedad y la precisión conseguida es del 92% (Priandana & Wahyu, 2020).

El estudio realizado por miembros activos de la IEEE en China publicado en el año 2020 presenta diferentes tipos de sensores usados en la agricultura para distintas variables. Se disponen

algunos sensores de humedad de suelo de bajo costo, que ya han sido utilizados en sistemas similares con buenos resultados. Los autores contemplan la toma de decisiones fundamentada en el conocimiento empírico de los expertos involucrados. También se abordan protocolos de comunicación estándar en la industria hoy en día como lo es MQTT, y se contempla el uso del Edge Computing (Rayhana et al., 2020). En el estudio (Qiu et al., 2020) también realizado por miembros de la sociedad IEEE de China abordan con más detalle el concepto de Edge Computing, así como características del IIoT.

Entre las normativas asociadas a los sistemas SCADA se pueden considerar: la normativa ISA95 que busca facilitar la integración de todos los sistemas de información en un entorno de fabricación desde las funciones empresariales hasta los sistemas de control en planta (Badenes & Francisco, 2020); la norma ISO 30141 provee una arquitectura genérica de referencia IoT usando un vocabulario común, diseños reusables y buenas prácticas para la industria; la norma ISO 9241 está enfocada a la calidad del diseño ergonómico de programas con visualización en pantalla de datos; de igual forma, la normativa ISO 101 pretende brindar orientación al momento de desarrollar una HMI para que sean seguras, eficientes y eficaces respecto al control de los procesos.

Ante el proceso de revisión bibliográfica se tiene que en todo el mundo se están realizando avances de automatización de procesos relacionados a viveros, invernaderos o a la agricultura en general, aprovechando las herramientas tecnológicas que han surgido en los últimos años con diversas técnicas de censado de variables, control de estas, transmisión y uso de datos, con el objetivo de generar una mejora respecto a los procesos disponibles en su momento. El manejo de variables ambientales como la temperatura y de la humedad tanto en el aire como en sustrato son

de las más comunes por su relevancia en los procesos. Sin embargo, a pesar de este gran avance, son muy pocos los estudios encontrados en los cuales se apliquen conceptos enmarcados desde el punto de vista industrial. En esto se tiene una gran oportunidad de explorar la idea y así determinar sus posibles ventajas y beneficios respecto al enfoque convencional.

2.1.2 Viveros y el control de humedad en sustrato

A continuación, se presenta la importancia de las variaciones de humedad en la propagación de plantas, y un análisis donde se considera la relevancia de los viveros con control de humedad en la actualidad.

2.1.2.1 Afectación de humedad en la propagación de plantas

La baja humedad en el suelo es el factor dominante, causante de estrés por resequedad en las plantas, presenta una limitación el crecimiento de éstas (Liu et al., 2020), provocando enfermedades por la presencia de bacterias como la *Rhizoctonia bataticola* que junto con la presencia de altas temperaturas genera enfermedades como la raíz seca que afecta ampliamente la producción de distintas plantas como *Cicer arietinum* o garbanzo (Sinha et al., 2021).

Es de valor contemplar que en las últimas tres décadas la humedad en el suelo en distintas regiones del mundo ha disminuido y ha aumentado el número de ecosistemas vulnerables que dependen de la disponibilidad de agua. Este hecho puede llevar a amplificar el efecto del cambio climático (Li et al., 2022), al mismo tiempo la humedad alta también trae efectos negativos como la propagación de hongos o enfermedades (Camacho et al., 2021). Siendo así, la declaración previa deja aún más claro que no tener controlada la humedad en los sistemas de propagación de plantas trae grandes afectaciones.

2.1.2.2 Viveros

Los viveros de propagación de plantas son un conjunto de instalaciones que tienen como propósito fundamental la producción de plantas en sus distintas etapas de crecimiento. En estos la producción vegetal constituye el mejor medio para seleccionar, producir y propagar masivamente especies que son útiles para los distintos usos que le puede dar el hombre. (Vásquez Yanes et al., 1997)

2.1.2.2.1 Importancia de los viveros

Los viveros tienen como objetivo asegurar el apropiado estado de salud para las plantas que allí se encuentran haciendo uso del ambiente controlado. Según su estado se realizan cambios en su entorno para tener condiciones de crecimiento favorables.

2.1.2.2.2 Tipos de viveros

Se puede considerar la clasificación en dos tipos de viveros de propagación de plantas (Quiñones et al., 2015):

- **Vivero Temporal:** Son aquellos que se establecen por periodos cortos. Constan de estructuras sencillas que generalmente son montados con materiales disponibles en la misma zona de siembra y se ubican en áreas de difícil acceso.
- **Vivero Permanente:** Son aquellos que se establecen por un tiempo indefinido y requieren una infraestructura básica como camas de germinación, sistema de riego, almacén, plan de producción y manejo. Algunos de estos viveros alcanzan dimensiones grandes con altos niveles de tecnología involucrada.

2.1.2.2.3 Sistemas de control en los viveros

Según el tipo de plantas se pueden establecer unos intervalos de humedad en el suelo como referencia: en el caso de riego para plantas de pimienta de cayena (Priandana & Wahyu, 2020) los

autores hacen uso del rango comprendido entre el 60% y el 80% de humedad en el suelo como el rango ideal; por otro lado, en el sistema para plantación de Gerbera (Kumkhet et al., 2022) los autores contemplan el rango de 70% a 80%.

2.1.3 IoT e IIoT

El internet de las cosas (IoT) y el Internet de las cosas Industrial (IIoT) han tenido un gran impacto en los últimos años dentro de la sociedad en diferentes contextos, desde hacer la lista de mercado de forma automática con una nevera inteligente, hasta el control de situaciones críticas en el río Thames por medio de una red de sensores con adquisición de datos en tiempo real permitiendo una respuesta rápida que ahorra un estimado de 930 mil Litros de agua cada día en Londres (Wipro Digital, 2023), y otros casos que suman a su relevancia cuando se tiene el apoyo de empresas como Microsoft (Vasisht et al., 2017) para incentivar la agricultura IoT que, en el caso de la agricultura de precisión, puede llegar a permitir duplicar la productividad (Almarshadi & Ismail, 2011; Mueller et al., 2012). A continuación, se presenta una breve explicación de los conceptos con sus posibles definiciones junto con información relacionada y una comparativa.

2.1.3.1 IoT

El IoT es una tecnología emergente que durante los últimos años ha generado que dispositivos que antes no contaban con conexión a internet ahora la tengan, cambiando la forma en la que la gente interactúa con el mundo y abriendo un sin número de oportunidades. Esta tecnología ya se encuentra estandarizada en ciertos aspectos, como lo son las posibles arquitecturas. Por ejemplo, tal como lo presentan (Sisinni et al., 2018) la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) se adhiere a una arquitectura IoT compuesta por cinco capas, sin embargo, múltiples autores en diferentes trabajos como (Xiaolin et al., 2012) o (Atzori et al., 2010) han propuesto un modelo IoT compuesto por tres capas como se describe a continuación:

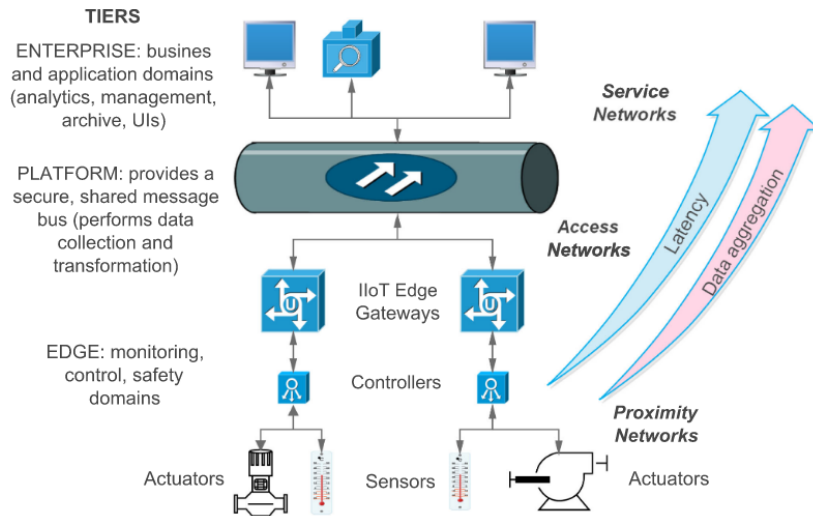
- **Percepción:** Es esta se adquieren los datos con los que trabaja el sistema desde cualquier dispositivo capaz de representar la información de interés cumpliendo el rol de sensor.
- **Red:** También denominada capa de transporte es aquella que permite la transmisión de datos de forma confiable entre las capas y fuera de estas.
- **Servicio:** Es aquella que incluye el manejo de datos y su uso para niveles superiores de servicios empresariales o usuarios finales a través de una interfaz adecuada.

2.1.3.2 IIoT

Se puede considerar como una evolución del IoT que está enfocada en la tecnología operativa, y puede revolucionar la producción y la manufactura mientras se integran tecnologías informáticas a la vanguardia (Tange et al., 2020). Los autores (Peter et al., 2023) sostienen que el IIoT está abriendo paso a una rápida transición hacia la industria 4.0 y va a facilitar enormemente tareas como ensamble de fábricas, manejo administrativo, de calidad y organización mientras soporta tecnologías como Machine Learning, PLC y SCADA.

Al igual que en el IoT una entidad ha propuesto arquitecturas de referencia para el IIoT: en este caso lo presentó la organización fundada por las empresas Intel, General Electric, Cisco, IBM entre otras, llamada Industrial Internet Consortium en (Industry IoT Consortium, 2019). Otras propuestas también han surgido como un modelo ampliamente aceptado de tres niveles que se presenta en la Figura 1. Se contempla el nivel Edge donde se encuentra la red de proximidad para adquirir los datos, consecuente, el nivel de Plataforma recibe los datos a través de la red de acceso y se procesan para el nivel de Empresa, transmitiendo por la red de servicio la información que va a ser usada en las interfaces de usuario (International Electrotechnical Commission, 2020).

Figura 1. Propuesta IIoT



Nota: Tomado de (Sisinni et al., 2018)

2.1.3.3 Relación con Industria 4.0 y comparación

Cuando se aterrizan las ideas de los CPS y del IoT en el mundo industrial se da lugar a la definición de la Industria 4.0, desarrollada para crear producciones inteligentes, productos y servicios inteligentes (Wollschlaeger et al., 2017). Por lo que se puede considerar que la Industria 4.0 es un resultado del IIoT que a su vez es un avance del IoT. Una comparación cualitativa entre el IoT y el IIoT donde se condensa parte de esta información presentada se proponen de la siguiente forma (Tabla 1) según (Sisinni et al., 2018).

Tabla 1

Comparativa entre el IoT y el IIoT

	IoT	IIoT
Impacto	Revolución	Evolución

Modelo de Servicio	Centrado en el humano	Orientado a las máquinas
Estado Actual	Dispositivos Nuevos y Normativas	Dispositivos existentes y Normativas
Volumen de datos	Medio a Alto	Alto a muy alto

2.1.4 Sistemas SCADA

Los sistemas SCADA son ampliamente utilizados en el ambiente industrial como suministros de agua, oleoductos, sistemas eléctricos entre otros, y se consideran como el medio para lograr la excelencia operativa a través de la maximización del rendimiento de los activos (Alanazi et al., 2023) (Wonderware Spain, 2023).

2.1.4.1 Componentes de los sistemas SCADA

Un sistema SCADA se puede describir por medio de los siguientes componentes (Alanazi et al., 2023):

- **Control de supervisión:** Es la función principal de la HMI disponible del sistema.
- **Adquisición de datos:** Puede darse por medio de un PLC o RTU con sus variables internas o recopiladas por elementos externos como sensores.
- **Almacenamiento de datos:** Usualmente se hace uso de bases de datos con marcas temporales haciendo uso de SQL con el objetivo de recopilar el comportamiento histórico de múltiples variables de distintos equipos.
- **Intercambio de datos:** Los datos en los sistemas SCADA suelen tener la posibilidad de transmitirse entre otros dispositivos por medio de protocolos bien establecidos.

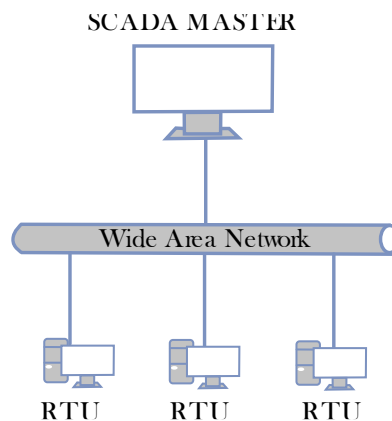
2.1.4.2 Arquitecturas de sistemas SCADA

Los sistemas SCADA se pueden configurar de distintas formas y se pueden clasificar en cuatro generaciones, a continuación, se presenta la descripción de cada una de acuerdo con lo propuesto en (Alanazi et al., 2023; Yadav & Paul, 2020):

2.1.4.2.1 Monolítica

Hace referencia a aquellos sistemas que trabajan aislados del ambiente y no tienen conexión con otros sistemas. Las RTU se comunican con las MTU usando Redes Área Amplia (WAN). Además, requiere de esquema de conmutación en espera en caso de una falla, resultando en un sistema costoso de mantener. Una representación de esta arquitectura se presenta en la Figura 2.

Figura 2. Arquitectura Monolítica

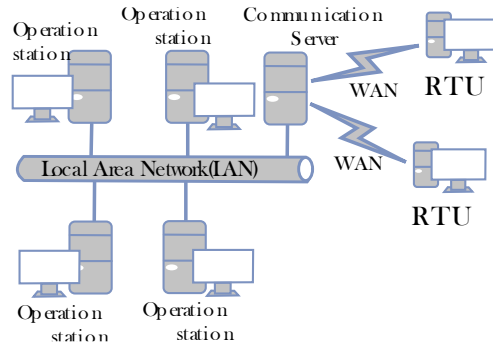


2.1.4.2.2 Distribuida

Está basada en la existencia de la interconectividad de redes y la miniaturización del sistema. Esta versión ha hecho que los sistemas SCADA sean más pequeños y menos costosos a comparación de la arquitectura monolítica. La configuración presente en la Figura 3 cuenta con un bus central asociado con la Red de Área Local para conectar a las estaciones de operación distribuidas y de esta manera puedan intercambiar los datos en tiempo real mientras que la WAN es utilizada para conectar las RTU a los servidores de comunicación por medio de protocolos

definidos. La confianza que se le puede dar al sistema se fundamenta en que las funcionalidades están repartidas entre las estaciones. Sin embargo, el principal problema de esta arquitectura yace en su confinamiento al hardware, software y protocolos ya definidos por el vendedor.

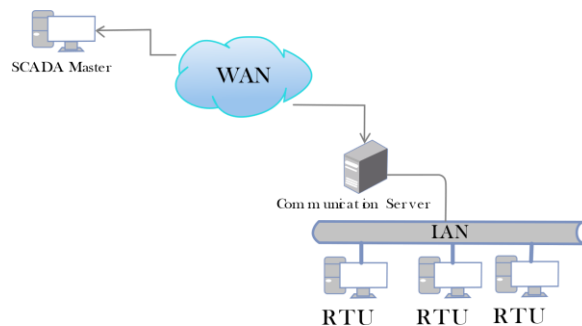
Figura 3. Arquitectura distribuida



2.1.4.2.3 En Red

El aumento constante en la demanda por industrias y manufacturers llevó a que los sistemas SCADA fueran planteados en red. Su principal diferencia respecto a la arquitectura Distribuida es que la arquitectura En Red está orientada a sistemas comerciales para todo público por medio del protocolo IP y ya no de protocolos preestablecidos. Como se puede ver en la Figura 4 se basa en conectar la MTU con la RTU por medio de WAN haciendo uso del protocolo IP donde otros componentes SCADA intercambian datos por Ethernet. Esta arquitectura ha mejorado el rendimiento al permitir correr servidores en paralelo para tratar distintas tareas.

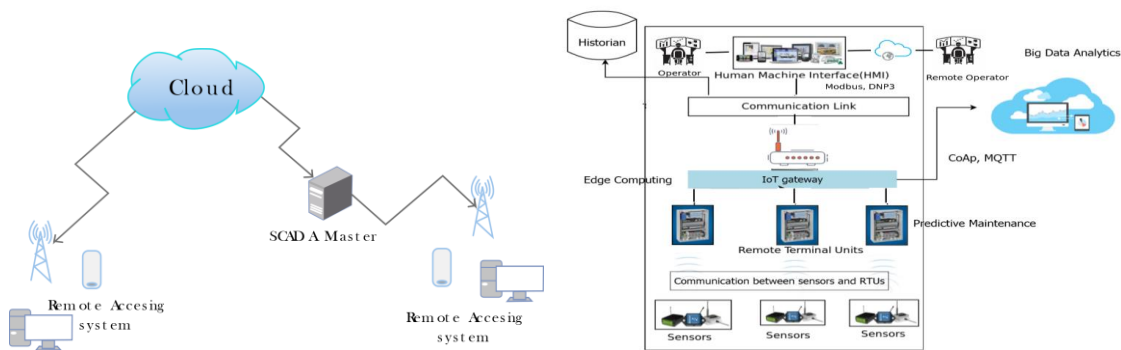
Figura 4. Arquitectura en red



2.1.4.2.4 IoT

En la Figura 5 (1) se presenta la arquitectura IoT que también es conocida como la arquitectura de cuarta generación. Está integrada con el IoT y la nube, una representación de esto se encuentra en la Figura 5 (2) trayendo múltiples ventajas a los sistemas SCADA como facilidad de uso, flexibilidad, disponibilidad, eficiencia de costos, entre otros. El desarrollo de esta arquitectura en la industria da paso al concepto del IIoT que ha mejorado la resiliencia al identificar comportamientos anormales usando la información disponible aumentando la producción del sistema.

Figura 5. (1) Arquitectura de cuarta generación. (2) Ejemplo Arquitectura SCADA



Nota: Tomadas de (Alanazi et al., 2023; Yadav & Paul, 2020)

2.1.4.3 Impacto de los sistemas SCADA

Cuando un sistema SCADA se encuentra implementado de forma correcta en su proceso se tiene un impacto significativo. Se han visto aplicaciones de sistemas SCADA en varias industrias para tanto monitorear como controlar procesos industriales. Estos sistemas recolectan y analizan datos de varios dispositivos y sensores, y utilizan estos datos para tomar decisiones que ayudan a mejorar la eficiencia, seguridad y rendimiento general.

Por ejemplo, en la industria del petróleo y gas, los sistemas SCADA se utilizan para monitorear y controlar remotamente las plataformas petrolíferas, tuberías y refinerías, lo que ayuda a mejorar la

eficiencia, reducir el tiempo de inactividad y minimizar el riesgo de accidentes. Además, los datos que los sistemas SCADA recolectan pueden utilizarse para tomar decisiones informadas sobre el mantenimiento del equipo, la asignación de recursos y otras decisiones importantes de negocios. Con la aparición de las tecnologías IoT y el aumento de dispositivos y sensores que se pueden conectar a estos sistemas, se espera que el uso de SCADA continúe creciendo y tenga un impacto aún mayor en la industria en el futuro.

2.1.5 Comunicación en redes industriales

En la industria se tienen múltiples fabricantes de distintos tipos de dispositivos donde varios de ellos llegaron a proponer sus propios protocolos para sistemas SCADA. Esto representa múltiples problemas de versatilidad y costos, motivo por el cual surgieron protocolos estandarizados en la industria para el intercambio de datos tanto dentro de la red local como fuera de ella. En la actualidad hay diferentes protocolos disponibles que son usados de forma abierta en sistemas SCADA, entre ellos se encuentran algunos como Modbus, DNP3, Profibus o OPC UA que pueden ser clasificados como protocolos tradicionales, Zigbee o LoRA pueden ser clasificados como protocolos IoT o incluso MQTT o CoAP pueden ser reconocidos como protocolos enfocados al IoT, estos protocolos mencionados son presentados con detalle en (Elkhodr et al., 2016; Yadav & Paul, 2020),

2.2 Método

El método seguido para el desarrollo de este proyecto consta de 3 fases posteriores a la revisión bibliográfica inicial que corresponden a la caracterización del caso de estudio, selección de componentes y rutina de control, y por último tanto el planteamiento como configuración del

sistema de control. Estas fases están enfocadas a responder los objetivos específicos planteados al inicio del proyecto.

- **Caracterización del caso de estudio:** En esta fase se analiza caso de estudio con el objetivo de alinear expectativas, aclarar el contexto que rodea al proyecto y así poder definir requerimientos, determinar capacidades y posibles restricciones como punto de partida que permita presentar una propuesta que satisfaga los interesados.
- **Selección de componentes y rutina de control:** La búsqueda y selección de componentes es una parte esencial de este proyecto pues por medio de este proceso se van a establecer sugerencias de compra enfocadas al momento de la implementación de este diseño, la selección de componentes se realiza a la par que se plantea y define la lógica de control. Aquí en todo momento se hace uso de los requerimientos determinados en la primera fase.
- **Planteamiento del sistema de control:** En esta fase se establece la relación entre los dispositivos, plataforma software y rutina de control que fueron sugeridos en la etapa previa, de igual forma se sugiere una posible distribución de este sistema en el vivero.

2.2.1 Caracterización del caso de estudio

El primer paso fundamental para lograr el adecuado diseño del sistema SCADA aplicado a un vivero de propagación de plantas es realizar una correcta caracterización del caso de estudio identificando las expectativas y requerimientos de los interesados dentro del contexto que rodea al proyecto determinando capacidades y restricciones. Esta caracterización fue presentada como informe ante el semillero CENIVAM con su respectiva aprobación. El informe puede ser visto en el Apéndice A. Informe caracterización caso de estudio.

2.2.2 Selección de componentes y rutina de control

Una vez definidas las limitaciones, recursos disponibles y los requerimientos de los interesados se inicia la etapa de selección de lógica de control, arquitectura del sistema, selección del software y del hardware.

2.2.2.1 Rutina de control

La rutina de control que se plantea para controlar la humedad en el sustrato se da de la siguiente forma:

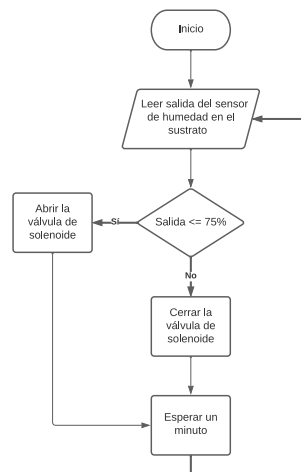
Debido a que el requerimiento para la variable de humedad en el suelo brindada por CENIVAM se basa en mantener el valor entre 70% y 80% se tiene en consideración que este es el mismo objetivo que se tenían en casos presentados en la sección de sistemas de control de viveros en el marco teórico: mantener la humedad en el suelo dentro de dos valores deseados. El planteamiento que tuvieron los autores en esos estudios fue prácticamente el mismo, accionar una electroválvula que permita el paso de agua a las plantas si la humedad en el sustrato registrada es inferior a la establecida, y en el caso que la humedad sea superior, la válvula se cierra cortando el paso de agua, impidiendo así en ambos casos que el valor de humedad llegue a un estado crítico y se mantenga así variando dentro del intervalo óptimo.

Esta técnica de control es bastante simple, asociada a un control ON/OFF, haciendo referencia a los dos posibles estados que tiene la salida. Sin bien, la lógica de control es simple a comparación de otras técnicas como PID o lógica difusa, esta como se evidenció en (Priandana & Wahyu, 2020) ha presentado resultados alentadores donde de 16 pruebas realizadas con un periodo de muestreo de 2 segundos tan solo 1 quedó por fuera del rango indicado. Para ese único caso los autores sugieren que se debió a fallas propias del sensor durante la prueba y no debido al planteamiento del sistema. Otro ejemplo estimulante es el caso de (Kumkhet et al., 2022) en donde el error

aproximado después de las pruebas fue de 5.6%, en ese caso el periodo de muestreo era de 1 hora. El resultado de estos antecedentes es positivo y sugiere que el método también es apropiado para la presente aplicación con posibles mejoras en los resultados al usar un periodo de muestreo corto, inferior a una hora.

Estableciendo un valor ideal de humedad en el sustrato de 75% donde este es el valor medio del intervalo recomendado y definiendo un periodo de muestreo de 1 minuto que es una respuesta inferior a una hora y no genera conflicto entre los cambios de los tags, con esto se puede generar el siguiente diagrama de flujo presente en la Figura 6:

Figura 6. Diagrama de la lógica de control



2.2.2.2 Selección del sistema SCADA

Partiendo del contexto del proyecto se definen 6 factores en los cuales la plataforma seleccionada debe presentar fortalezas. La información de las plataformas contempladas relacionada a dichos factores se encuentra disponible en el Apéndice B. Información plataformas SCADA.

De acuerdo con la información recopilada, todas las plataformas presentan fortalezas en los diferentes parámetros definidos y permiten establecer un diseño acorde a las necesidades de las

industrias, sin embargo, la plataforma seleccionada para este proyecto es Ignition de Inductive Automation pues esta presenta ventajas en los parámetros de Diseño y Acceso ya que cuenta con mejoras en factores como la programación en Python o la versión de prueba sin límite de recursos internos o temporales. Dichos factores que facilitan el desarrollo de este proyecto y adicional a esto, la plataforma es cada vez más relevante en la industria brindando servicios a empresas multinacionales de gran renombre y de distintos enfoques como *Pfizer*, *Johnson & Johnson*, *Shell* o *Coca-Cola*, por lo que tener un contacto directo con esta plataforma genera un interés considerable para el proyecto educativo en el que se enmarca este trabajo de investigación. Se presentó este análisis a los interesados de dicho proyecto obteniendo su aprobación.

2.2.2.3 Selección de la arquitectura.

Considerando las 4 posibles arquitecturas de un sistema SCADA presentadas en el marco teórico, es natural pensar que tanto la *arquitectura en red* como la arquitectura de *cuarta generación* (IoT) pueden ser usadas en este proyecto, sin embargo, es importante resaltar que hacer uso de esta última opción presenta múltiples ventajas tanto por las características propias de la arquitectura como por la afinidad con la plataforma SCADA Ignition. El análisis de esto se presenta a continuación:

2.2.2.3.1 Ventajas de IoT vs en Red.

La arquitectura de cuarta generación presenta múltiples ventajas naturales al compararse con la arquitectura en red por su definición, algunas de estas se presentan así:

- **Conectividad:** La arquitectura de cuarta generación permite conectar más dispositivos y sensores al sistema, aumentando la cantidad de datos que se pueden recolectar y analizar. Esto se logra a través del uso de varios protocolos de comunicación como MQTT, CoAP, entre otros. Estos protocolos están diseñados para manejar la gran

cantidad de datos generados por los dispositivos IoT y proporcionar una comunicación de baja latencia entre los dispositivos y el sistema SCADA.

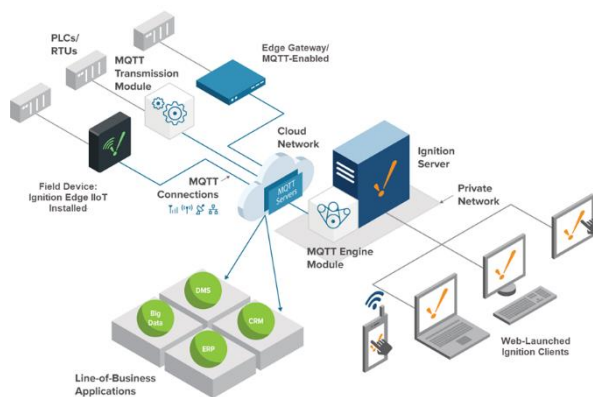
- **Análisis de datos:** Con más datos disponibles, los sistemas SCADA IoT pueden utilizar técnicas avanzadas de análisis como el aprendizaje automático, la inteligencia artificial y el análisis de datos masivos para mejorar la toma de decisiones y optimizar las operaciones. Esto permite un monitoreo en tiempo real, mantenimiento predictivo y optimización de los recursos.
- **Monitoreo y control remoto:** Los sistemas SCADA IoT permiten el monitoreo y control remoto de dispositivos y sistemas, mejorando la eficiencia y reduciendo la necesidad de intervención manual. Esto se logra a través del uso de interfaces web y aplicaciones móviles que proporcionan datos en tiempo real y permiten el control remoto de los dispositivos.
- **Seguridad:** Los sistemas SCADA IoT pueden utilizar características de seguridad avanzadas como el cifrado, los protocolos de comunicación y el arranque seguros para protegerse contra amenazas cibernéticas y acceso no autorizado. Esto asegura que los datos y el control del sistema solo son accesibles por personal autorizado.
- **Escalabilidad:** Con IoT SCADA, aumentar el número de dispositivos y sensores conectados al sistema es más fácil que en la versión en red, esto se logra a través del uso de plataformas basadas en la nube, que proporcionan la infraestructura necesaria para escalar el sistema según sea necesario, sin la necesidad de adquirir hardware o recursos adicionales.

En resumen, ofrece características avanzadas, escalabilidad y seguridad superiores en comparación con los sistemas SCADA tradicionales en red, mediante el uso de tecnologías como la computación en la nube, el aprendizaje automático, el análisis de datos masivos y muchas otras.

2.2.2.3.2 Afinidad con Ignition.

Sumado a las ventajas de la arquitectura de cuarta generación sobre la arquitectura en Red, la empresa Inductive Automation en su página web (Inductive Automation, 2023) describe esta arquitectura como la arquitectura IIoT de un sistema SCADA e indica que al hacer uso de esta se puede recopilar datos de cualquier dispositivo en el borde de la red, publicar los datos a un bróker central y enviar estos datos a aplicaciones industriales. De igual forma comentan que se pueden conectar a diferentes PLC por medio del módulo de transmisión MQTT. El bróker MQTT puede estar *in situ*, en la nube o incluso consolidando un híbrido entre estas dos, el gateway con el módulo MQTT Engine puede suscribirse a cualquier dato que sea publicado por el bróker, y esta información puede ser utilizada en cualquier aplicación de Ignition. Un ejemplo gráfico de una configuración de esta arquitectura por medio de Ignition se presenta a continuación en la Figura 7:

Figura 7. Arquitectura Ignition



Nota: Tomada de (Inductive Automation, 2023)

En donde se pueden identificar las siguientes componentes clave:

- **Dispositivos de campo:** Corresponden a los dispositivos de cualquier tipo que pueda ser usado para conectarse a un PLC o RTU que pueda publicar datos a un servidor MQTT. Estos dispositivos pueden ser dispositivos independientes con MQTT habilitado, servidores Ignition con el módulo *MQTT Transmission*, o un dispositivo Edge de Ignition con MQTT.
- **Servidor MQTT (Bróker):** Es un servidor que puede comunicarse con los dispositivos de campo por medio de MQTT, este puede ser una puerta de enlace de Ignition con el módulo de MQTT correspondiente instalado o un servidor independiente.
- **Suscriptores:** Cualquier tipo de aplicación que se suscribe a tópicos del servidor MQTT, la puerta de enlace o gateway que va a recibir los datos a representar en la HMI. Guardar en la base de datos se considera también como una suscripción. Este gateway es el que debe contar con el módulo *MQTT Engine* instalado.

La arquitectura de cuarta generación (IoT) de sistemas SCADA es la seleccionada para este diseño por las ventajas presentadas previamente, por su alta compatibilidad y versatilidad con la plataforma SCADA Ignition, así mismo se hará uso del protocolo MQTT.

2.2.2.3.3 Selección del servidor MQTT.

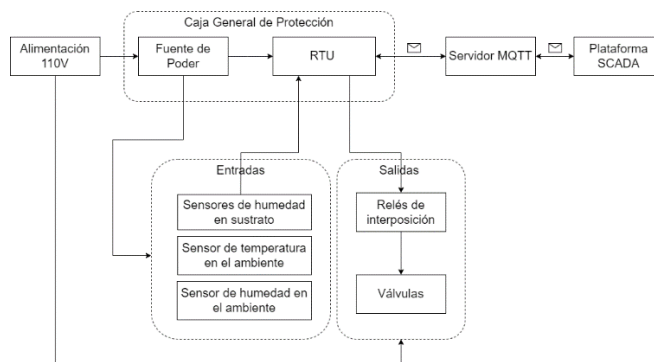
Esta selección se basó en la recomendación por parte de los entes relacionados al proyecto. Existen diferentes proveedores como lo son Mosquitto, VerneMQ, entre otros, los cuales perfectamente pueden ser aplicados en este esquema. Sin embargo, se opta por la opción aportada: HiveMQ, ya que este ha sido implementado previamente de manera exitosa por algunos involucrados en el proyecto, además de ser una opción ampliamente usada en la industria.

HiveMQ dispone una versión gratuita que suplirá a cabalidad las necesidades de la arquitectura en cuanto a espacio y latencia. Aun así, ofrece una versión paga, dando paso a un posible aumento o avance en medida de lo necesario, en el marco que este proyecto se desarrolla.

2.2.2.5 Relación entre componentes.

En este punto se representa gráficamente la forma en que interactúan entre sí los componentes del sistema. Se hace uso del suministro de tensión de 110 V en alterna ya disponible en el vivero para alimentar la fuente de poder, a través de esta se alimenta la RTU que registra las variables asociadas a los sensores de humedad en el sustrato y las asociadas a la temperatura y humedad general del vivero. Los datos de estas variables son enviados a la plataforma SCADA por medio de un servidor MQTT, y de forma similar la RTU ahora ejerce la acción de control de permitir o no el paso de agua sobre las válvulas al abrirlas o cerrarlas. Una representación gráfica de esta relación es presentada en la Figura 8.

Figura 8. Interacción entre dispositivos del sistema



2.2.2.6 Definición de hardware.

El proceso de selección de los componentes físicos del sistema se presenta a continuación:

2.2.2.6.1 RTU.

En relación con los terminales de entradas y salidas se tuvo en consideración que la RTU debe contar con por lo menos 6 puertos disponibles para configurar las entradas de los sensores y las salidas que finalmente van a accionar las electroválvulas. De igual forma es ideal que la RTU presente facilidad al momento de establecer la configuración de la conexión con servidor MQTT seleccionado y la plataforma SCADA.

Tomando en consideración que en una etapa previa se seleccionó Ignition como la plataforma SCADA a usar, se consultó en la página web del proveedor del sistema SCADA y se logró identificar que hay dispositivos disponibles que tienen especial afinidad con Ignition, presentando desde puertas de enlaces para redes móviles hasta pantallas táctiles con Ignition completamente integradas en el sistema desde sus ajustes iniciales.

Entre esos dispositivos disponibles se encuentran dos referencias de RTU diferentes que incluso tienen configuración interna ya lista para establecer comunicación haciendo uso del protocolo MQTT. Estos dispositivos ya se encuentran probados y certificados por Inductive Automation para tener completa compatibilidad con la plataforma Ignition y con el protocolo MQTT, lo que se traduce a una aplicación directa que facilita los procesos y reduce errores. Las dos RTU que propone Inductive Automation son el Groov RIO y el Groov EPIC presentados respectivamente en la Figura 9. (1) Groov RIO, (2) Groov EPI.

Figura 9. (1) Groov RIO, (2) Groov EPIC



Nota: Tomado de <https://blog.opto22.com/optoblog/get-your-groov-rio-update> y <https://www.automation.com/en-us/articles/2018/bills-deep-dive-opto-22-epic-system-programmable-e>

Se presenta información relevante de ambos equipos en su última versión por medio de una comparación enfocada en sus características técnicas principales que pueden afectar el desarrollo del proyecto como se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Características técnicas RTU Opto22

	Groov RIO	Groov EPIC
Referencia	GRV-R7-MM2001-10	GRV-EPIC-PR2
Alimentación	10-32 VDC PoE clase 0 802.3af	110-240 VAC, 24-48 VDC, Pass-through 10-15 VDC, según la fuente de poder.
RAM	2 GB	3.75 GB
Espacio para el usuario	7 GB	22 GB
Consumo de Potencia	10 W	7 W
Tensión de salida	0-10 VDC	12-250 VAC, 5-60VDC según módulo
Entrada de corriente	0-20 mA o 4-20 mA Resolución de 1 uA Tasa de refresco de 550 ms	-20 a +20 mA, 0-20 mA o 4-20 mA Según módulo
Entrada de tensión	0-10 V Resolución de 0.5 mV Tasa de refresco de 550 ms	Según módulo, ver Figura 10
Costo aproximado	6.100.000 COP*	12.200.000 COP*

Nota: * El valor fue convertido de USD a COP y aproximado de acuerdo con una relación 1 USD = 4700 COP.

Figura 10. Entradas de tensión Groov EPIC

Specification	GRV-IV-24		GRV-IVI-12		GRV-IVIRMS-10	
Input Ranges	±160.0 VDC	±80.0 VDC	±160.0 VDC	±80.0 VDC	300.0 V _{rms} AC/DC	150.0 V _{rms} AC/DC
	±40.0 VDC	±20.0 VDC	±40.0 VDC	±20.0 VDC	60.0 V _{rms} AC/DC	30.0 V _{rms} AC/DC
	±10.0 VDC	±5.0 VDC	±10.0 VDC	±5.0 VDC	20.0 V _{rms} AC/DC	10.0 V _{rms} AC/DC
	±2.5 VDC	±1.25 VDC	±2.5 VDC	±1.25 VDC	5.0 V _{rms} AC/DC	1.0 V _{rms} AC/DC
					0.5 V _{rms} AC/DC	

- **Análisis y conclusión**

Ambas opciones presentan la posibilidad de publicar y recibir datos por medio de MQTT/Sparkplug B, cuentan sistemas de redundancia *Watchdog* y vienen con la versión 8 de Ignition preinstalada de fábrica. El fabricante ofrece soporte técnico para sus productos por parte de ingenieros con décadas de experiencia de forma gratuita al contar con alguno de sus productos.

En resumen, el GRV-R7-MM2001-10 es una excelente opción para proyectos pequeños y medianos de automatización industrial, mientras que el GRV-EPIC-PR2 es una mejor opción para proyectos más grandes y exigentes que requieren un mayor rendimiento y capacidad de procesamiento de datos. Considerando que el contexto de este proyecto puede ser suplido tanto por el Groov RIO como del Groov EPIC se hace un análisis de la situación y se tiene como resultado que no se justifica ni técnica ni monetariamente escoger el Groov EPIC sobre el Groov RIO ya que este último por un costo cercano a la mitad puede también brindar un gran nivel de versatilidad mientras se cumple con los requerimientos, y por ende el Groov RIO es la seleccionada.

2.2.2.6.2 Fuente de poder.

Según las características eléctricas de la RTU seleccionada, la fuente de poder debe suministrar una tensión entre 10 y 32 VDC, y debe poder suministrar 10 W de potencia. De igual forma la fuente a seleccionar debe estar diseñada para funcionar a partir de una alimentación monofásica a 120 VAC. Una vez identificados estos requisitos mínimos se realiza una búsqueda en el mercado de fuentes de poder comúnmente usadas en la industria, seleccionando las siguientes opciones:

	6EP1336-3BA00 (Siemens)	1606-XLE120E (Allen Bradley)	6EP1334-3BA10 (Siemens)
Alimentación	1 Fase 85-132 VAC 1 Fase 176-264 VAC	1 Fase 100-120 VAC 1 Fase 200-240 VAC	1 Fase 85-264 VAC 2 Fases 176-550 VAC
Tensión de salida	24 VDC	24 VDC	24 VDC
Corriente de salida	20 A	5 A	10 A
Potencia	480 W	120 W	240 W
Protección EN60529	IP20	IP20	IP20
Costo	1.816.453 COP	1.098.221 COP	1.433.157 COP

La selección entre estas opciones disponibles se basó en el precio como factor decisivo ya que las tres opciones presentadas cumplen ampliamente con los requerimientos establecidos y son de fabricantes reconocidos en la industria los cuales ofrecen soporte y garantía. Es por ello por lo que la elección recomendada es la Allen Bradley 1606-XLE120E presente en la Figura 11.

Figura 11. Fuente de poder Allen Bradley 1606-XLE120E



Nota: Tomado de <https://www.rockwellautomation.com/es-mx/products/details.1606-XLE120E.html>

2.2.2.6.3 Breaker.

Respecto a la selección de breakeres para el sistema se tuvo en cuenta que estos limitarían correctamente las corrientes que circulan en el circuito teniendo el valor adecuado para cada terminal en el que se encuentran asociados, se identificó la posibilidad de implementar:

- **2 breaker de 2 A:** Donde uno de ellos es para la alimentación de la RTU y el otro para el circuito asociado a las salidas de la RTU que van a controlar las válvulas. Para esto se pueden considerar las siguientes referencias: Schneider Electric iC60N C 2A, ABB S201-C2
- **1 breaker de 1 A:** Este actuará como protección de la entrada a la fuente de poder. Para esto se pueden considerar las siguientes referencias: Schneider Electric iC60N C 1A, ABB S201-C1
- **1 breaker de 6 A:** Para ubicarse en la salida a 24 V de la fuente de poder. Para esto se pueden considerar las siguientes referencias: Schneider Electric iC60N C 6A, ABB S201-C6

2.2.2.6.4 Caja general de protección (CGP).

Para la selección de la caja general de protección se tuvo en consideración una que permitiera realizar montaje de equipos sobre riel, esta debía ser resistente al agua y al polvo bajo el estándar IP65 o NEMA 4x enfocada a baja tensión y con dimensiones suficientes para cubrir completamente los componentes eléctricos del sistema. Entre las posibles referencias se tiene la 5504084 de Autosolar con dimensiones 80x60x35 cm con protección IP65 por un valor de 772.000 COP y la AX 1054.000 de Rittal con dimensiones 60x60x25 cm con protección IP66 por un valor de 740.000 COP. Esta última es la seleccionada al ser de un fabricante reconocido a nivel mundial, tener mejor protección contra agua y polvo y tener un costo similar.

2.2.2.6.5 Sensores.

En el proceso de selección de sensores se consideran dos factores necesarios:

- El primero es el tipo de medición, pues en cada aplicación la variable de interés a medir determina el tipo de sensor requerido, el tipo de variable también asocia especificaciones como lo es el valor nominal, el rango de valores, la exactitud, la precisión y la velocidad de medida, sin dejar de lado las condiciones ambientales donde se realizará dicha medida.
- El segundo factor son las características de salida del sensor. La selección de dispositivos se hace necesario que la señal de salida sea analógica, digital o en frecuencia según la aplicación planteada para el mismo.

Con base en estos factores se puede identificar características propias de los mismos como rango, exactitud, linealidad, velocidad de respuesta, confiabilidad, facilidad de mantenimiento, duración, requisitos de alimentación eléctrica, solidez, disponibilidad y costo.

La preselección de estos sensores se realiza teniendo en cuenta lo siguiente:

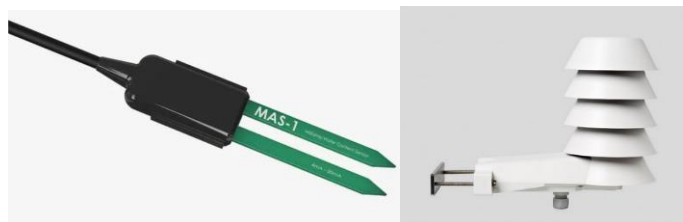
- El sistema se implementará en un vivero dedicado a propagación de plantas. Para el funcionamiento del sistema se requiere de la medición de la humedad en el sustrato, así como humedad y temperatura en el ambiente.
- Se seleccionó una fuente de tensión que tiene como salida 24 VDC, motivo por el cual los sensores a utilizar deberán ser compatibles con esta tensión de entrada.
- La RTU que recibirá la señal de los sensores para el proceso de motorización permite señales analógicas en el rango de 4 a 20mA o de 1 a 10V. Pero la cantidad de entradas analógicas de la RTU es limitada. Por tal motivo en el diseño se determina que se

dispondrán de 4 entradas analógicas de corriente (4 a 20mA) y 2 entradas analógicas de voltaje (1 a 10V).

- Los sensores estarán ubicados en un ambiente expuesto al agua y el polvo. Las temperaturas de operación serán elevadas alcanzando valores cercanos a casi 30°C.
- Siguiendo estas restricciones establecidas, por medio de una búsqueda en el mercado se determinan sensores afines a los requerimientos presentados. Con base en los requisitos se realiza una comparativa entre 3 posibles sensores de humedad y otra comparativa entre 3 posibles termohigrómetros para así poder seleccionar una referencia para cada caso. Las tablas en las que se condensa la información utilizada para la selección de sensores se encuentran disponible en el Información relacionada a los sensores.

Al concluir esta comparativa se determina que los mejores sensores entre las opciones presentadas para esta aplicación corresponden al MAS-1 presente en la Figura 12 (1) para realizar la medición de humedad en el sustrato debido principalmente a su tecnología de sensado y el termohigrómetro HMS83 presente en la Figura 12 (2) debido principalmente a su costo.

Figura 12. (1) Sensor de humedad en el sustrato. (2) Sensor de temperatura y humedad en el ambiente.



Nota: Tomado de MAS-1 4-20 Milliamp Soil Moisture Sensor | METER Environment (metergroup.com)

2.2.2.6.6 Electroválvulas

Tras realizar una búsqueda en el mercado y consultar con los encargados del vivero se encuentra que, para la agricultura enfocada a invernaderos y viveros, las tuberías normalmente usadas son

de 1 pulgada de diámetro por lo que este es uno de los parámetros usados para buscar las electroválvulas.

La RTU puede llegar a permitir el accionamiento de 24VDC en sus canales 7, 8 y 9 como salida de tensión, tensión que puede ser suficiente para accionar una electroválvula, sin embargo, la demanda de corriente no puede superar los 2A sin comprometer la integridad del equipo. Considerando que la corriente de arranque de las electroválvulas podría llegar a exceder dicho límite se contempla utilizar relés de interposición, que se activen en base al estado de las salidas de la RTU, con la tensión de 24VDC de la fuente y permitan así el paso de la tensión alterna de 110VAC a 60Hz que alimenta el sistema para las válvulas. De esta manera se designan tres candidatos.

- U.S. Solid USS2-00030: Válvula Normalmente Cerrada para tuberías de 1” con cuerpo de latón que puede operar a 110VAC, apropiada para uso con líquidos como agua, calientes hasta 120°C o fríos desde -10°C, es usualmente empleada para el control de sistemas de riego. Puede operar a presiones de hasta 232 PSI, trabaja a 10 VA. Tiene un costo aproximado de 235.000 COP cada unidad de acuerdo con su fabricante.
- ASCO 221 series Solenoid Valve: Válvula Normalmente Cerrada de acción lenta con cuerpo de latón para tuberías de 1”, que puede operar a 110VAC, puede soportar agua fría desde 0°C y caliente hasta 120°C, está diseñada para rápido mantenimiento y para trabajar en interior o exterior, soporta presiones hasta 150 PSI, trabaja a 16 VA con un máximo de 30 VA. Tiene un costo aproximado de 4.700.000 COP cada unidad de acuerdo con su fabricante.
- U.S. Solid USS-ZSV Series: Válvula Normalmente Cerrada para tuberías de 1” con acople mecánico NTP y cuerpo de aleación de Zinc que puede operar a 110VAC,

apropiada para uso con líquidos como agua, calientes hasta 120°C o fríos desde -10°C, es usualmente empleada para el control de sistemas de riego. Puede operar a presiones de hasta 116 PSI, trabaja a 22 VA. Tiene un costo aproximado de 160.000 COP cada unidad de acuerdo con su fabricante.

Se selecciona la válvula U.S. Solid USS-ZSV presente en la Figura 13. Electroválvula esto debido a su calidad con respecto a su precio asequible, ya que cuesta menos que la U.S. Solid USS2-00030 y su principal diferencia radica en el material que reduce los rangos de temperatura y presión en los que puede operar la válvula, sin embargo, esto no se traduce a limitante pues para el vivero se plantea hacer uso de agua bajo condiciones ambientales.

Figura 13. Electroválvula U.S. Solid USS-ZSV



Nota: Tomado de <https://ussolid.com/u-s-solid-solenoid-valve-1-zinc-alloy-110v-ac-solenoid-valve-nbr-seal.html>

2.2.2.6.7 Relés de interposición

Los relés van a ser accionados con la tensión de 24VDC proveniente de la fuente y van a permitir el paso de 110VAC, por lo cual, un relé realizará la función lógica de transformar la señal de salida DC por parte de la RTU en un estado de paso o de cierre de la corriente a la válvula. De esta manera, las salidas de la RTU estarán aisladas de las bobinas de mayor consumo, protegiendo el sistema.

La referencia del relé de interposición seleccionado es la 700-HLT1Z24 de Allen Bradley presente en la Figura 14 que se activa con 24VDC, puede trabajar a 110VAC, y soporta corriente nominal de hasta 6A, lo cual es suficiente para asegurar la integridad y el funcionamiento del sistema ante posibles picos de corriente durante el arranque.

Figura 14. Relé de interposición 700-HLT1Z24 Allen Bradley



Nota: Tomado de <https://www.rockwellautomation.com/es-ar/products/details.700-HLT1Z24.html>

2.2.2.7 Resumen de componentes seleccionados.

La recopilación de los componentes tanto de hardware como de software seleccionados con el costo asociado que estos representan se presenta de forma compacta a continuación por medio de la Tabla 3:

Tabla 3
Listado de componentes seleccionados

	Referencia	Cantidad	Costo [COP]
RTU	GRV-R7-MM2001-10 (Opto22)	1	6.100.000*
Fuente de poder	1606-XLE120E (Allen Bradley)	1	1.200.000*
Sensor de humedad	MAS-1	3	2.700.000*
Termohigrómetro	HMS83 (Vaisala)	1	1.600.000*
Breaker	iC60N C 1A (Schneider Electric)	1	50.000

Breaker	iC60N C 6A (Schneider Electric)	1	30.000
Breaker	iC60N C 2A (Schneider Electric)	2	100.000
CGP	AX 1054.000 (Rittal)	1	740.000
Electroválvula	USS-ZSV (U.S. Solid)	3	480.000*
Relés	700-HLT1Z24 (Allen Bradley)	3	460.000
Licencia SCADA	Plataforma Ignition	1	4.700.000*
Licencia SCADA	Ignition Edge	1	3.800.000*
Servidor MQTT	Versión gratuita (HIVE MQ)	1	0
TOTAL			22.060.000

*Nota. *El valor fue convertido de USD a COP y aproximado de acuerdo con una relación 1 USD = 4700 COP. No se considera el costo de las tuberías ni de las boquillas debido a que por el alcance del proyecto no se seleccionan. Tampoco se consideran costos de importación de los equipos.*

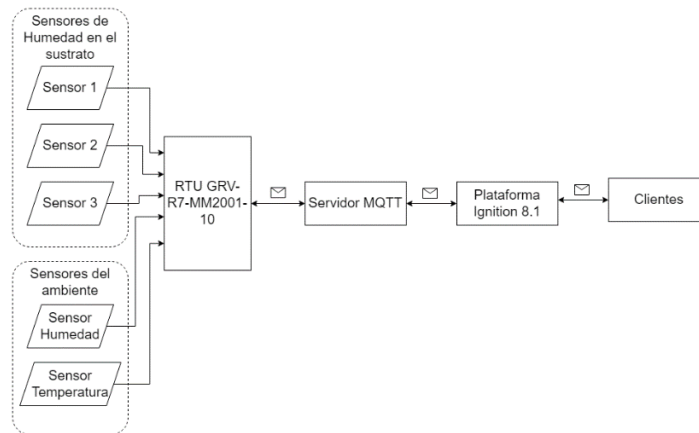
2.2.3 Configuración del sistema de control

Teniendo definidos los componentes y la lógica de funcionamiento se puede establecer la estructura en la que se va a basar el sistema, que en este caso se describe por medio de la configuración de los siguientes 5 componentes:

2.2.3.1 Flujo de información.

El flujo de información en un sistema SCADA es sumamente importante, pues es base de un correcto funcionamiento. A continuación, se presenta un diagrama de flujo en la Figura 15 relacionado al flujo de información en el sistema:

Figura 15. Flujo de información del sistema SCADA



En esta figura se reflejan los componentes que interactúan con la información entre sí, indicando si es de comunicación en un solo sentido como el caso entre la RTU y los sensores o si la relación es bidireccional como sucede entre la RTU y el servidor MQTT.

2.2.3.2 Configuración de la RTU.

La configuración asociada a la RTU se divide en dos partes, la configuración física o la configuración de hardware y la configuración de software, el planteamiento requerido para el funcionamiento del sistema como se diseñó se presenta a continuación:

2.2.3.2.1 Hardware:

De acuerdo con la interacción entre los dispositivos del sistema presentada en el esquema propuesto en la Figura 15 se realiza la configuración de los componentes seleccionados. La RTU cuenta con dos tipos de circuitos, el circuito de control y el circuito de potencia, ambos planos asociados se encuentran en el Apéndice D. Plano distribución eléctrica control y potencia y la descripción de estos se presenta a continuación:

- **Circuito de Potencia:**

La RTU es alimentada por medio de la fuente de tensión que suministra 24VDC. La conexión entre ellas se realizará con un arreglo de cables de un calibre acorde al amperaje que se puede

presentar en esta rama. En este caso un cable calibre AWG 18 que puede manejar hasta 10 A es más que suficiente al contemplar el uso del breaker de 6 A seleccionado anteriormente. La fuente de poder no solo alimenta la RTU sino que también alimenta los elementos externos que son los asociados a los terminales de entrada (sensores) y salida de la RTU (Relés). Para esto se sigue el uso de breakeres de 2A de acuerdo con la capacidad máxima de la RTU.

En esta sección también se considera la configuración física de la fuente de poder, la cual se alimenta a partir de la tensión monofásica a 120 VAC disponible en las instalaciones del vivero, sin embargo, por protección se hace uso del breaker de 1A y un cable de calibre AWG 20.

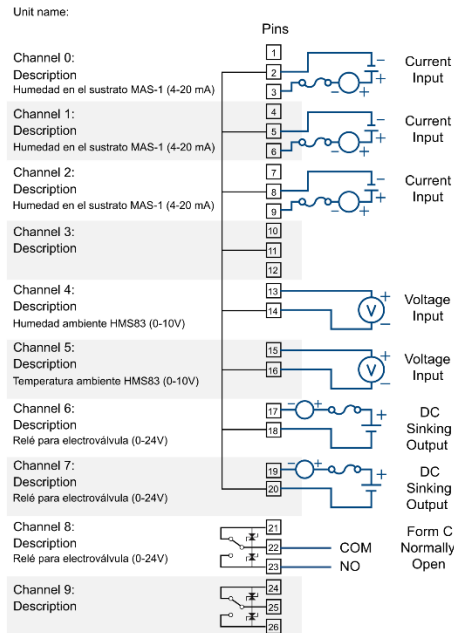
- **Circuito de Control:**

La RTU recibe a través de su conexión con los sensores los datos asociados a las variables de interés y a su vez ejecuta acciones de control sobre las electroválvulas que permiten o no el paso del agua. En este caso hay 3 sensores de humedad en el sustrato, 1 termohigrómetro y 3 relés que van a accionar las electroválvulas. Estos 7 componentes se conectan a la RTU por medio de sus terminales siguiendo la siguiente distribución:

Los 3 sensores al ser de corriente se ubican en los tres primeros terminales, pues son los asociados a este tipo de entrada. Adicionalmente se asocian los puertos 4 y 5 a entradas analógicas de voltaje en caso de necesitar incluir nuevos sensores sin tener que ampliar los puertos de la RTU.

Los tres relés se pueden ubicar tanto en salidas de tensión en los terminales 6 y 7 o por medio de los Relevos disponibles en últimos dos puertos.

Figura 16. Configuración de canales RTU

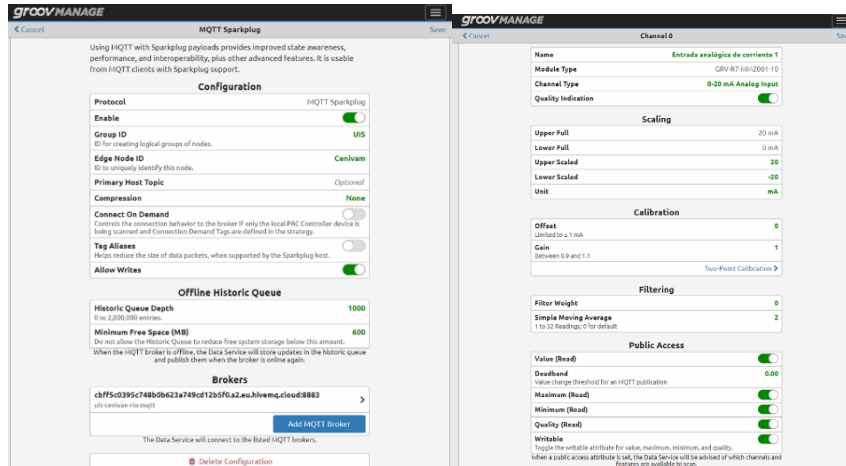


2.2.3.2.2 Software:

La configuración de la RTU se divide en dos partes principales. La primera es la selección e instalación del cliente. Con base a esta selección se determina la forma de trabajo del equipo y la asignación de las entradas y salidas. Como la RTU seleccionada es el Groov Rio, la disposición de entradas y salidas se limita únicamente a las que están en el entorno local del equipo.

La segunda parte trata sobre la configuración del protocolo de comunicación. En este proyecto se utilizó MQTT Sparkplug (Figura 17 (1)). Por consiguiente, en esta etapa se configuran los identificativos de Grupo, Nodo y dispositivo, elementos claves cuando se trabaja con el protocolo Sparkplug B.

Figura 17. (1) Configuración de MQTT Sparkplug. (2) I/O Manage



Hechas estas dos modificaciones, se habilita el servicio de entradas y salidas de la RTU, donde solo queda por determinar el modo de trabajo de cada uno de los canales de entrada y salida. En este punto es necesario remarcar que al trabajar con I/O locales (Figura 17 (2)) la operación y distribución de estos están limitados por las opciones que define el dispositivo.

2.2.3.3 Enlace MQTT

La configuración de la comunicación MQTT trata de dos componentes: configuración del servidor o bróker Hive MQ y configuración del módulo MQTT Engine en Ignition que permite enviar los datos de la RTU al servidor MQTT, el desarrollo de estas componentes se presenta de forma detallada en el Apéndice E. Configuración comunicación por MQTT.

2.2.3.4 Distribución Espacial

Con el fin de facilitar el proceso de implementación de este diseño propuesto se realizaron planos que representan a forma de esquema la distribución espacial planteada del vivero por parte de los encargados. Con la distribución espacial se hace referencia a cómo estarían ubicados los

estantes, la caja de protección general donde se encuentra la RTU, ubicación de sensores, electroválvulas, la fuente de poder, la salida de agua disponible, la distribución de las tuberías, funciones asociadas a las áreas del vivero y la entrada al mismo. Manteniendo la idea acordada con CENIVAM de una distribución por módulos.

En Colombia, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural es el encargado de establecer las regulaciones para los viveros de plantas. Tras un proceso amplio de búsqueda se identificaron regulaciones y normas aplicables en materia de construcción y zonificación que pueden incluir requisitos para la construcción de instalaciones, uso del suelo, construcción de estructuras y la seguridad en caso de desastres naturales. Estas regulaciones, si bien son necesarias, están enfocadas al diseño de la infraestructura total del vivero y no contemplan un formato o estándar específico con el que se debe presentar un plano de distribución con el cual se debería ceñir el entregable asociado a este proyecto.

En la resolución No. 0780006 en el año 2020 el Instituto Colombiano de Agricultura (ICA) y el Ministerio de Agricultura presentan en conjunto los requisitos establecidos para el registro de viveros y huertos básicos dedicados a la producción y comercialización de material vegetal de propagación, en el apartado 6.2 contemplan diferentes áreas destinadas para diferentes tareas como lo es producción técnica, producción comercial, manejo de sustratos, manejo de residuos vegetales y no vegetales, almacenamiento de equipos, entre otros. En esta resolución ponen como requisito entregar un croquis detallado del vivero brindando información relacionada como coordenadas geográficas, límites, distribución, y áreas destinadas al desarrollo de la actividad indicando las dimensiones en metros y el área en metros cuadrados.

Es importante resaltar que dentro del alcance de este proyecto no se contempla realizar el diseño de adecuación del vivero basado en las normativas vigentes, sumado a que este planteamiento de

distribución fue consensuado y aprobado por los miembros del grupo CENIVAM encargados del mantenimiento del vivero. Debido a esto, se realizó el plano de distribución física según lo planteado para que incluya parte de los requerimientos de información solicitados por el ICA como coordenadas geográficas, áreas delimitadas y dimensiones. Dicho plano realizado se puede encontrar en el Apéndice F. Plano de distribución física del vivero.

2.2.3.5 Configuración del SCADA

En primera instancia, se instala el software dedicado para el sistema SCADA en la computadora local del ingeniero encargado. Específicamente se trabaja con Ignition versión 8.1.17. La característica principal de Ignition es que funciona a través de Gateways a partir de una IP. Por lo que, luego de instalar las dependencias, el primer contacto con el software es por medio del navegador:

En adición, es necesario instalar un programa que permita diseñar la interfaz gráfica en conjunto a las configuraciones lógicas del sistema, para lo cual es de suma importancia descargar el Designer Launcher de la misma línea de productos Ignition. De esta forma se crea un ambiente de trabajo para el Gateway listo para su uso a través de una IP localhost, un usuario y su respectiva contraseña:

La razón de trabajar en una máquina local es debido a la rapidez que esto conlleva, teniendo en cuenta que todo lo que se realice puede ser trasladado a otro computador de manera sencilla con las copias de seguridad que genera Ignition para cada Gateway, además de contemplar que de esta forma es como se va a trabajar en futuras ediciones de la plataforma, con los clientes.

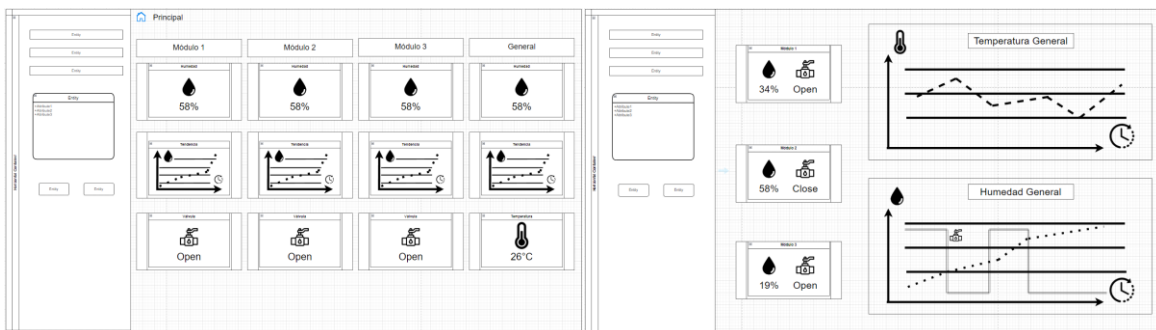
2.2.3.5.1 Distribución gráfica

La idea principal de los sistemas de supervisión de datos es mostrar lo necesario para el correcto funcionamiento del sistema de automatización. Según la ISO 9241 se debe priorizar la claridad y la coherencia en el aspecto de la interfaz. Por esta razón, el primer paso dado fue la realización de un esquema que proporcionara los aspectos relevantes con el fin de tener una referencia guía.

El diagrama de la Figura 18 se hizo basado en la selección del software previamente hecha, teniendo en cuenta las herramientas y posibilidades disponibles. De esta forma se demuestran las variables necesarias del sistema: la humedad de sustrato y el estado de válvula en cada módulo; y la humedad y temperatura general del lugar.

Cabe resaltar que esto es solo un esquema guía por lo que el diseño no está totalmente ligado a alcanzar esta apariencia. El producto final es presentado a partir de las adecuaciones y disponibilidad a la hora de hacer uso del sistema.

Figura 18. Diagrama ejemplo Interfaz SCADA.



Nota: hecho por Gilbert Delgado en diagrams.net

Particularmente, el diseño se destaca en la interacción, así como la visualización de las variables de manera histórica. Por esta razón es necesario tener presente la configuración de una base de datos para el uso en Ignition. La dinámica contempla que cada módulo tenga una ventana para la visualización de sus variables históricas dedicadas.

2.2.3.5.2 Configuración del Gateway:

Ignition maneja unas configuraciones privadas para cada Gateway. Por esta razón se debe adecuar específicamente para este trabajo:

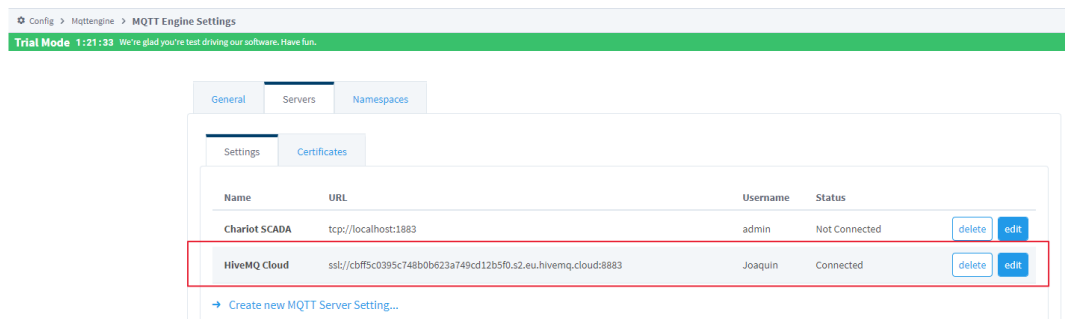
- **Módulos de comunicación**

Para establecer la conexión con la RTU se hizo necesario el uso del Módulo MQTT Engine facilitado por Ignition en la página de enseñanza *Inductive University*. Es un archivo *.modl* que va a ser usado para la instalación. Por consiguiente, se debe ingresar en la configuración del Gateway a la sección *Modules* ubicado en el apartado de *System*. Al final de la página se encuentra la opción de instalar, siguiendo unos pocos pasos de selección de archivo y demás para la efectiva instalación.

De esta manera, luego del proceso de instalación, el módulo tendrá su propia sección en la configuración del Gateway, donde podrá ser usado para la conexión de la comunicación entre la RTU y las dependencias de Ignition.

Se genera un *MQTT Server Setting*, ingresando un usuario, contraseña y especificando la dirección para enlazar el servidor MQTT, en este caso HiveMQ tal como se evidencia en la Figura 19.

Figura 19. Apartado MQTT Engine Settings



- **Base de datos**

Como fue mencionado con anterioridad al momento de presentar la idea de la interfaz es necesaria una base de datos para las gráficas con historial de datos. Debido a que esta característica es bastante común en los sistemas SCADA, Ignition facilita el acceso con solo identificar el tipo de base de datos y el enlace para la conexión.

El servidor usado es de MySQL generado a partir de un contenedor con el aplicativo Docker. Así mismo una IP es generada, la cual es usada también en la configuración del Gateway, en el apartado de *Database Connections* identificado en la Figura 20 a continuación.

Figura 20. Apartado Database Connections



Es así como todas las configuraciones previas estarían preparadas y listas para el uso en la aplicación de diseño de Ignition. El ambiente usado es Perspective, el cual permite diseños muy modernos de ventanas y apartados para una amigable y eficiente interacción con el sistema SCADA.

2.2.3.5.3 Configuración de tags

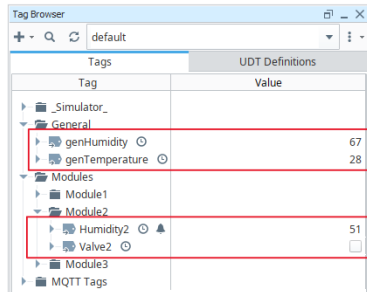
- **Referencias, expresiones y constantes**

Gracias a la previa configuración del módulo MQTT Engine, los valores generados por la RTU son publicados en el servidor MQTT para que finalmente lleguen a Ignition en forma de tags, listos para ser usados.

Los tags pueden ser accedidos a través del *Tag Browser* en el apartado de MQTT Engine. Sin embargo, la dirección de acceso puede resultar extensa para su continuo uso. Por lo tanto, un paso

bastante útil es crear un directorio de tags personalizado de fácil acceso como el de la Figura 21 que haga referencia a los valores reales de los sensores.

Figura 21. Ejemplo de Reference tags

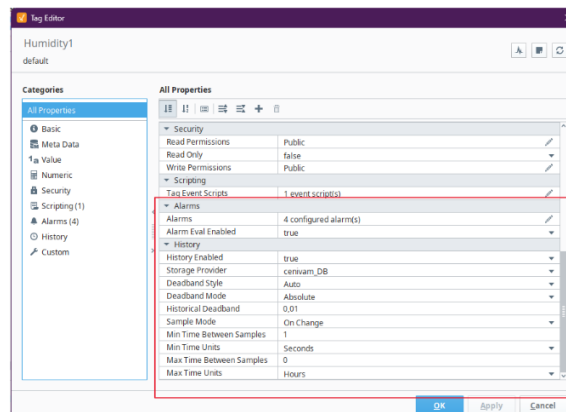


Una opción propuesta en el SCADA es la posibilidad de editar el rango de humedad que el sistema de control deberá mantener. Para lograr este acabado se crean dos tags de memoria, actuando como unas constantes del límite máximo y el mínimo de operabilidad, estos tags se presentan como números enteros. Estos valores serán editados a través de un *slider* a presentar en la creación de vistas, en la pantalla de visualización de cada módulo por separado.

- **Alarmas e Historial**

Una ventaja de usar Perspective consiste en la facilidad de establecimiento de las alarmas. Cada tag tiene una serie de características editables, algunas de estas se presentan en la Figura 22 y entre esas se encuentran dos principales en muchos sistemas SCADA, *Alarms & History*.

Figura 22. Tag Editor



Para activar el guardado automático del tag en una base de datos solo hace falta habilitar esta opción en la sección de *History* y seleccionar el proveedor de almacenamiento. Por otro lado, con respecto a las alarmas, se configura la expresión que quiera ser evaluada cada vez que ocurra un cambio de valor en el tag.

Principalmente, se establecieron cuatro alarmas para cada módulo con respecto al valor de la humedad como se muestra en la figura:

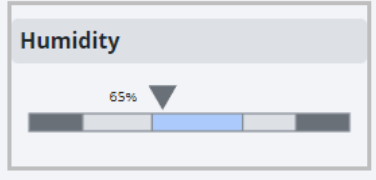
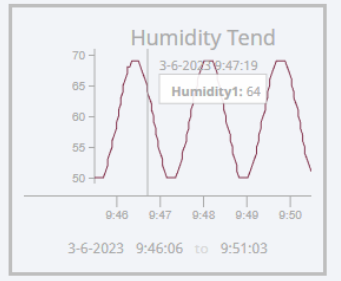
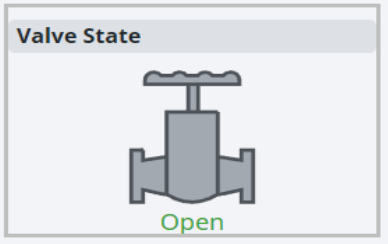
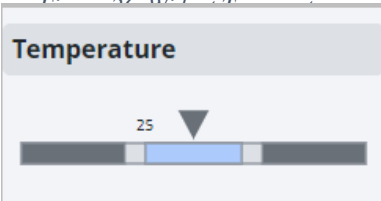
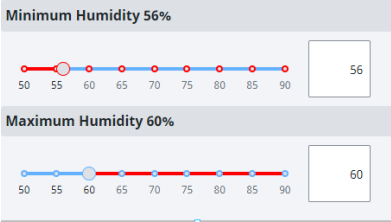
- *CritHigh*: Se considera una humedad tan alta que es perjudicial para las plantas, por lo cual se identifica con un estado crítico por encima del 90%.
- *CritLow*: Humedad por debajo del 50%, lo que puede causar enfermedades, de igual manera prioridad crítica.
- *High*: Valores de humedad por encima de un valor máximo establecido por el usuario del sistema SCADA en el vivero (*Memory Tag -Max-*).
- *Low*: Valores de humedad por debajo de un valor mínimo establecido de igual forma (*Memory Tag -Min-*).

2.2.3.5.4 Creación de ventanas:

- **Widgets**

Partiendo del diseño guía, se implementó una vista de las variables empleadas por módulo, con ayuda de gráficas que hicieran sencilla y rápida la comprensión de la información. Debido a que los sistemas automatizados normalmente se separan por módulos o estaciones que comparten características, es conveniente crear un molde, llamado “Widget”, que pueda ser replicado sin tanta complicación. Los widgets se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Widgets

Widget	Descripción	Imagen
Medición de la humedad	Medidor analógico en forma de barra, el cual se puede editar fácilmente para mostrar la humedad del sustrato o la general con un simple parámetro. La zona azul indica el rango ideal, mientras que la gris clara y gris oscura son zonas de alarma, donde la más oscura es crítica	<p>Figura 23. Widget humedad</p> 
Gráfica de tendencia de Humedad	Gráfica de humedad contra el tiempo con el fin de ver el comportamiento de esta variable dentro de un rango definido, en este caso dispuesto de cinco minutos.	<p>Figura 24. Tendencia humedad</p> 
Estado de válvula	Devuelve de manera visual si la electroválvula correspondiente al módulo está abierta o cerrada	<p>Figura 25. Widget válvula</p> 
Temperatura general	Muestra numéricamente la temperatura del vivero con unos rangos definidos para las alarmas al igual que el widget de humedad.	<p>Figura 26. Widget temperatura</p> 
Control de humedad	Con este widget se puede ajustar el rango ideal para que el sistema de control mantenga un valor de humedad específico. Se puede editar a través de una <i>slider</i> o ingresando el valor en la caja de texto.	<p>Figura 27. Control humedad</p> 

- **Navegación y encabezado**

Es común en las páginas web tener una navegación estándar mediante encabezados y menús que no se aleteran en ninguna circunstancia. No siendo la excepción, se implementa un menú vertical en un lateral y un encabezado superior con información relevante del sistema como alarmas y usuario de sesión. Todo esto se puede ver en la Figura 29

- **Ventanas**

- **Home (Figura 29):** Por norma general de los sistemas SCADA, es necesaria que la pantalla principal tenga la capacidad de informar al usuario de todas las actividades ocurrientes del sistema. De esta manera, la ventana Home muestra la humedad y el estado de válvula de cada módulo, así como también se muestra las mediciones de temperatura y humedad general.
- **Medición de variables ambientales:** Muestra la temperatura y la humedad del vivero en general. Figura 30.
- **Alarmas:** En esta ventana se puede ver agrupadas las alarmas que hayan ocurrido, así como también las vigentes con la posibilidad de descartarlas, o, en otras palabras, hacer saber al sistema que ya se ha solucionado el problema y puede dejar de notificar la alarma.
- **Módulos Individuales:** Permite al usuario del sistema SCADA ajustar el rango de humedad deseado de cada módulo por separado, además de visualizar las correspondientes variables en una gráfica temporal con sus respectivos widgets. Figura 31.
- **Información adicional:** Se deja una pestaña para obtener información “Acerca de” el proyecto y dar contexto. El botón de “More Information” lleva a la página web del proyecto macro.

2.3 Resultados.

En esta sección se darán a conocer los resultados del diseño del sistema de control junto al SCADA propuesto y elaborado para el vivero comandado por el semillero CENIVAM de la Universidad Industrial de Santander. Lo mostrado a continuación es el producto final entregado para su próxima implementación.

2.3.1 Resumen del diseño del sistema

De manera preliminar, en cuanto a la raíz del proyecto, este proyecto surge como un caso de estudio de una futura plataforma que busca entrenar profesionales en la industria 4.0, esta aplicación de la plataforma se asocia con la automatización de un vivero en la Universidad Industrial de Santander en búsqueda de optimizar procesos. En este punto se hizo necesaria la correcta caracterización, obteniendo información acerca del acabado que el grupo de investigación (CENIVAM) encargado del vivero querría obtener junto con sus necesidades, entre las que se identificó la posibilidad de automatizar la acción de riego en el vivero. El diseño partió de la disposición del vivero y las ideas propuestas, es decir, la infraestructura y la acomodación realizada por CENIVAM.

En primer lugar, se estudió de qué forma se podría abordar el control de humedad en el suelo. Estudios sugieren que un control de riego ON/OFF aplicado según la humedad registrada por sensores de humedad en el sustrato, permitiendo o no el paso de agua a las plantas acorde a un punto de ajuste (setpoint) presenta resultados favorables. En general se buscó que el sistema de control fuera robusto y que este se encontrara trabajando con equipos y estructuras que están a la vanguardia de la industria debido a la base del proyecto. Tanto la plataforma SCADA como la

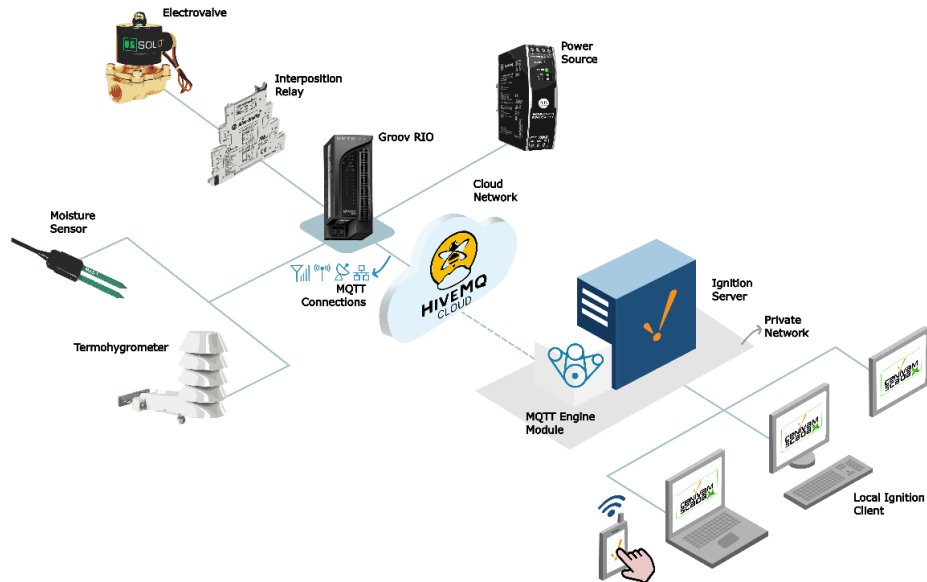
arquitectura fueron seleccionadas analizando el contexto y las características de las opciones disponibles, definiendo el uso de la plataforma Ignition y la arquitectura de cuarta generación en sistemas SCADA.

Partiendo de los componentes identificados como necesarios para el desarrollo de este diseño, se realizaron distintos esquemas que representan la interoperabilidad del sistema en términos de las acciones de control o de comunicaciones ya descritas. Al mismo tiempo se busca que estos esquemas actúen como guía para la implementación. Entre estos componentes identificados se encuentran sensores, servidores, unidades de procesamiento, fuentes de poder, entre otros, con unos requerimientos específicos determinados para el correcto funcionamiento del sistema. Con base en dichos requerimientos se realizan búsquedas en sus respectivos mercados con el objetivo de encontrar opciones que se ajusten de la mejor manera a esta aplicación con procesos cuantitativos y cualitativos para la selección de estos. Cabe aclarar que el alcance de este trabajo no contempla el montaje del sistema, sino que se enmarca únicamente en el diseño con la idea que, cuando sea implementado, el diseño sea efectivo llevando así al funcionamiento adecuado.

El planteamiento del sistema propone que la RTU en el vivero se va a comunicar con un servidor MQTT el cuál provee servicios de bróker a los clientes, para este caso el principal cliente es la plataforma SCADA que va a estar recibiendo esos datos que provienen de la RTU y al mismo tiempo enviándole la acción de control correcta según la lógica aplicada. De tal forma, la única componente faltante del sistema se relaciona con la configuración intrínseca de la plataforma SCADA. El funcionamiento general, la visualización y demás requisitos para que fuese posible el ensamble del software SCADA con el sistema de control físico, fueron abordados en un computador personal a distancia del vivero en Ignition por ventajas de eficiencia como de sencillez. Luego de realizados todos los ajustes necesarios relacionados al diseño de la interfaz

HMI, manejo de bases de datos y lógica de control se tiene una versión exportable del diseño que puede ser aplicada con éxito al momento de su implementación descrita en el vivero.

Figura 28. Arquitectura diseñada



2.3.2 Resultado de la interfaz HMI

El único requisito para el uso de la interfaz gráfica es contar con las mismas configuraciones de Ignition que se han dispuesto en este documento. Es así como a través de un usuario y una contraseña es posible acceder a las pantallas diseñadas y en su defecto, editar los valores necesarios. Los resultados finales de la interfaz se muestran en las siguientes figuras (Figura 29, Figura 30, Figura 31).

Figura 29. Vista general HMI



Figura 30. Datos ambientales HMI

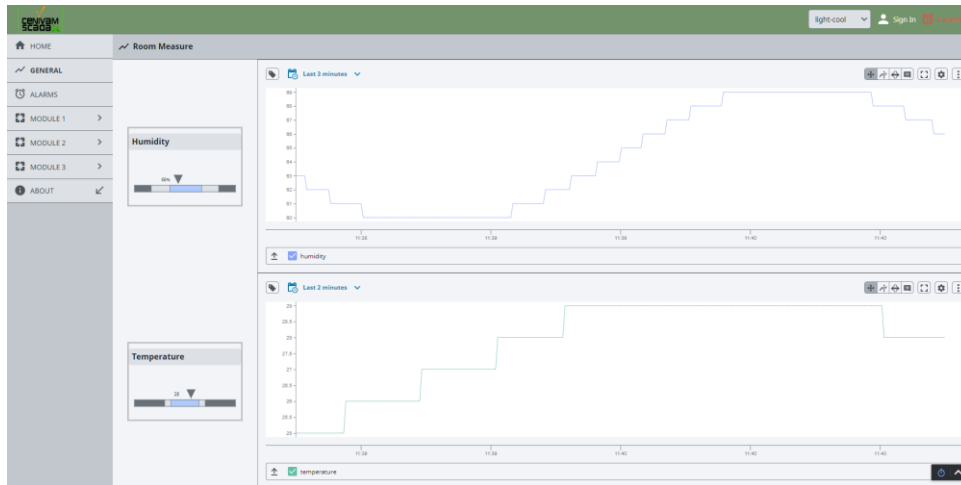
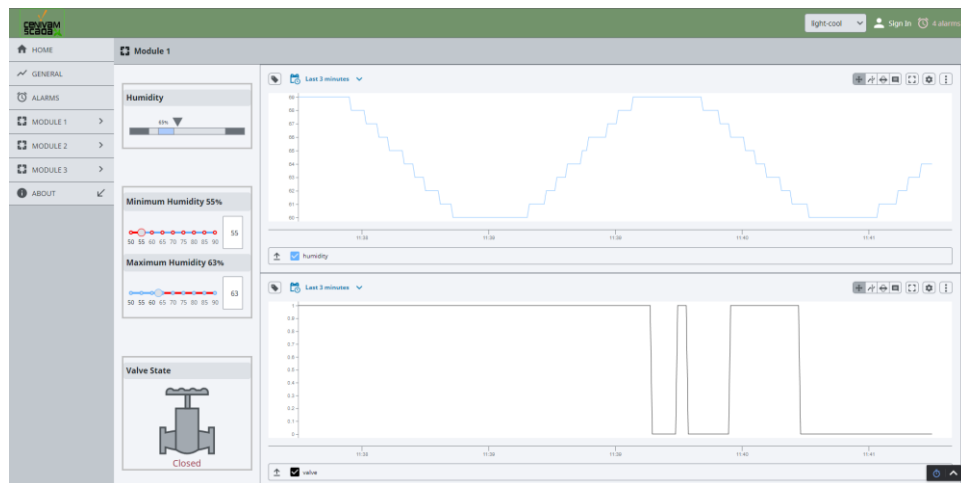


Figura 31. Módulo individual HMI



3. Conclusiones

Los sistemas SCADA son excelentes herramientas de monitoreo tanto de manera remota como local, los cuales pueden ser aplicados en cualquier sistema que requiera la automatización de un proceso, retornando información valiosa y precisa que sin dicha tecnología sería más compleja la recolección de datos y su visualización. Los aspectos que se destacan son el registro de datos y las alarmas generadas en respuesta. De esta manera, en el presente proyecto se realizó el diseño completo de un sistema SCADA haciendo uso de tecnologías de carácter industrial en la agricultura que constituyen un sistema robusto desde la recepción de los datos con precisión pasando por la transmisión de estos con seguridad en la infraestructura física y virtual, incluyendo la fase de aplicación donde el usuario accede y usa la información desplegada que se actualiza de manera constante con la posibilidad de generar beneficios de rentabilidad en el negocio.

Este diseño está enfocado principalmente para sistemas que operen en viveros de tipo permanente debido a los requerimientos que el proyecto macro “Plataforma IIoT para la formación de profesionales” dispuso. Las ventajas de realizar un buen diseño constan sobre que la implementación sea más ordenada y sin mayores contratiempos. Además, afianza los alcances del proyecto, desarrollando la idea de factibilidad a la hora de llevar a cabo la solución designada. Por otra parte, un sistema de supervisión es de mucha ayuda para las entidades dedicadas a la investigación. Desde la recolección de información hasta el mantenimiento del sistema. En este campo de la agricultura, abre puertas al conocimiento y expansión de las tecnologías de la nueva era, dando a conocer las técnicas y documentando soluciones para que puedan ser deliberadas con la intención de aplicarlas y avanzar como nación.

4. Recomendaciones

Al momento de realizar el montaje del sistema los autores sugieren tener en cuenta los siguientes factores:

1. Distribuir las bandejas o las boquillas de riego en sistema de distribución de tal forma que el riego llegue de la forma más uniforme posible a la mayoría de las plantas.
2. Las electroválvulas deben elegirse de acuerdo con el diámetro de la tubería seleccionada.
3. Contemplar las posibles afecciones que pueden tener las señales de los sensores tanto de tensión como de corriente de acuerdo con las distancias recomendadas y realizar las compensaciones necesarias.

El presente diseño contempla su uso extenso y demandante debido a su relación directa con el proyecto macro “Plataforma IIoT para formación de profesionales”. Sin embargo, los objetivos propuestos pueden ser desarrollados y alcanzados con una solución más económica y con un nivel similar de eficiencia.

Por ser un proyecto industrial aplicado, se usaron herramientas de la misma índole como lo fueron la RTU Groov Río y el software SCADA Ignition. En comparativa, un microcontrolador de tipo Raspberry o Espressif puede ser empleado para un trabajo más ligero, reduciendo altamente los costos, pero sacrificando fiabilidad. No obstante, es válido mencionar que, por razones de desarrollo, los productos que se dedican al campo industrial y de la automatización son mucho más acogedores a la hora del montaje y también en el uso debido al gran soporte que manejan de antemano las empresas proveedoras.

Referencias Bibliográficas

- Alanazi, M., Mahmood, A., & Chowdhury, M. J. M. (2023). SCADA vulnerabilities and attacks: A review of the state-of-the-art and open issues. In *Computers and Security* (Vol. 125). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2022.103028>
- Almarshadi, M. H., & Ismail, S. M. (2011). ORIGINAL ARTICLES Effects of Precision Irrigation on Productivity and Water Use Efficiency of Alfalfa under Different Irrigation Methods in Arid Climates. In *Journal of Applied Sciences Research* (Vol. 7, Issue 3).
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
- Badenes, O., & Francisco, R. (2020). *La Norma ISA 95: Introducción y Estructura Apellidos, nombre.*
- Camacho, J., Alvarado, D., & Manrique, J. (2021). *Sistema de monitoreo de Temperatura, Humedad y PH en un cultivo basado en Internet Of Things (IoT), mediante red WiFi y 4G LTE.* <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2021/183204.pdf>
- Elkhodr, M., Shahrestani, S., & Cheung, H. (2016). The Internet of Things: New Interoperability, Management and Security Challenges. *International Journal of Network Security & Its Applications*, 8(2), 85–102. <https://doi.org/10.5121/ijnsa.2016.8206>
- Fei, X., Xiao-Long, W., & Yong, X. (2021). Development of Energy Saving and Rapid Temperature Control Technology for Intelligent Greenhouses. *IEEE Access*, 9, 29677–29685. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3059199>
- Inductive Automation. (2023). *IIoT Architecture.* [https://docs.inductiveautomation.com/display/DOC81/IIoT+Architecture.](https://docs.inductiveautomation.com/display/DOC81/IIoT+Architecture)

- Industry IoT Consortium. (2019). *The Industrial Internet of Things Volume G1: Reference Architecture*.
- International Electrotechnical Commission. (2020). *IoT 2020: Smart and secure IoT platform*.
- José, I., & Alvarado Ruiz, A. (n.d.). *Supervisión SCADA de producción en un proceso de autocompostaje*.
- Kumkhet, B., Rakluea, P., Sangmahamad, P., Pirajanchai, V., Pechrkool, T., & Sutham, T. (2022). IoT-based Automatic Brightness and Soil Moisture Control System for Gerbera Smart Greenhouse. *Proceedings of the 2022 International Electrical Engineering Congress, IEECON 2022*. <https://doi.org/10.1109/IEECON53204.2022.9741578>
- Li, W., Migliavacca, M., Forkel, M., Denissen, J. M. C., Reichstein, M., Yang, H., Duveiller, G., Weber, U., & Orth, R. (2022). Widespread increasing vegetation sensitivity to soil moisture. *Nature Communications*, *13*(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31667-9>
- Liu, L., Gudmundsson, L., Hauser, M., Qin, D., Li, S., & Seneviratne, S. I. (2020). Soil moisture dominates dryness stress on ecosystem production globally. *Nature Communications*, *11*(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18631-1>
- Mueller, N. D., Gerber, J. S., Johnston, M., Ray, D. K., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2012). Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*, *490*(7419), 254–257. <https://doi.org/10.1038/nature11420>
- Peter, O., Pradhan, A., & Mbohwa, C. (2023). Industrial internet of things (IIoT): opportunities, challenges, and requirements in manufacturing businesses in emerging economies. *Procedia Computer Science*, *217*, 856–865. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.282>

- Pinto, D. M., De Oliveira, P., Minitti, A. F., Mendes, A. M., Freitas Vilela, G., Spadotti, G., Castro, A., Rodrigues, L., Júnior, N., Bogiani, J. C., Dilcio Rocha, J., Milagres, R., Novaes, L., De Barros, I., & Rodrigues, G. S. (2021). Impact Assessment of Information and Communication Technologies in Agriculture: Application of The Ambitec-TICs Method. In *J. Technol. Manag. Innov. 2021* (Vol. 16, Issue 2). <http://jotmi.org>
- Priandana, K., & Wahyu, R. A. F. (2020, February 1). Development of Automatic Plant Irrigation System using Soil Moisture Sensors for Precision Agriculture of Chili. *Proceeding - ICoSTA 2020: 2020 International Conference on Smart Technology and Applications: Empowering Industrial IoT by Implementing Green Technology for Sustainable Development*. <https://doi.org/10.1109/ICoSTA48221.2020.1570615896>
- Qiu, T., Chi, J., Zhou, X., Ning, Z., Atiquzzaman, M., & Wu, D. O. (2020). Edge Computing in Industrial Internet of Things: Architecture, Advances and Challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 22(4), 2462–2488. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3009103>
- Quiñones, J. R., Domingo, S., & Dominicana, R. (2015). *Manual diseño y organización de viveros*.
- Rayhana, R., Xiao, G., & Liu, Z. (2020). Internet of Things Empowered Smart Greenhouse Farming. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 4(3), 195–211. <https://doi.org/10.1109/JRFID.2020.2984391>
- Rose, D. C., & Chilvers, J. (2018). Agriculture 4.0: Broadening Responsible Innovation in an Era of Smart Farming. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2(December), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00087>

- Sinha, R., Irulappan, V., Patil, B. S., Reddy, P. C. O., Ramegowda, V., Mohan-Raju, B., Rangappa, K., Singh, H. K., Bhartiya, S., & Senthil-Kumar, M. (2021). Low soil moisture predisposes field-grown chickpea plants to dry root rot disease: evidence from simulation modeling and correlation analysis. *Scientific Reports*, *11*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85928-6>
- Sisinni, E., Saifullah, A., Han, S., Jennehag, U., & Gidlund, M. (2018). Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *14*(11), 4724–4734. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2852491>
- Sott, M. K., Furstenu, L. B., Kipper, L. M., Giraldo, F. D., Lopez-Robles, J. R., Cobo, M. J., Zahid, A., Abbasi, Q. H., & Imran, M. A. (2020). Precision Techniques and Agriculture 4.0 Technologies to Promote Sustainability in the Coffee Sector: State of the Art, Challenges and Future Trends. *IEEE Access*, *8*, 149854–149867. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3016325>
- Subahi, A. F., & Bouazza, K. E. (2020). An Intelligent IoT-Based System Design for Controlling and Monitoring Greenhouse Temperature. *IEEE Access*, *8*, 125488–125500. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007955>
- Tange, K., De Donno, M., Fafoutis, X., & Dragoni, N. (2020). A Systematic Survey of Industrial Internet of Things Security: Requirements and Fog Computing Opportunities. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, *22*(4), 2489–2520. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3011208>
- Vasisht, D., Chandra, R., Kapoor, A., Sinha, S. N., Sudarshan, M., Stratman, S., Kapetanovic, Z., Won, J., & Jin, X. (2017). *FarmBeats: An IoT Platform for Data-Driven Agriculture*. <https://www.usenix.org/conference/nsdi17/technical-sessions/presentation/vasisht>

- Vásquez Yanes, C., Orozco, A., Rojas, M., Sánchez, M. E., & Cervantes, V. (1997). *La reproducción de las plantas: semillas y meristemos* (1st ed., Vol. 1).
- Wipro Digital. (2023). *Thames Water: A Strategic Move into Predictive Planning*. <https://wiprodigital.com/cases/progressive-metering-a-utilitys-strategic-move-into-predictive-planning/>.
- Wollschlaeger, M., Sauter, T., & Jasperneite, J. (2017). The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 11(1), 17–27. <https://doi.org/10.1109/MIE.2017.2649104>
- Wonderware Spain. (2023). *¿Qué es SCADA?* <https://www.wonderware.es/hmi-scada/que-es-scada/>.
- Xiaolin, J., Quanyuan, F., Taihua, F., & Quanshui Lei. (2012). *RFID technology and its applications in Internet of Things (IoT)*. IEEE.
- Yadav, G., & Paul, K. (2020). *Architecture and Security of SCADA Systems: A Review*. <http://arxiv.org/abs/2001.02925>

Apéndices

Apéndice A. Informe caracterización caso de estudio

En este anexo se presenta el informe de caracterización realizado a lo largo del desarrollo del proyecto en que se contemplan requerimientos, interesados, ideas y dispositivos planteados.

- **Identificación de los interesados**

El caso de estudio tiene como interesados directos a la Universidad Industrial de Santander (UIS), al Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL), al Centro Nacional de Investigación para la Agroindustrialización de Especies Vegetales Aromáticas y Medicinas Tropicales (CENIVAM) y a la empresa Diseño y Automatización Industrial SAS (DAUTOM), una empresa con más de 9 años de experiencia en el diseño, desarrollo e integración de tecnologías en proyectos de base industrial. En la Tabla A1 se hace una descripción de los interesados.

Tabla A1

Interesados en el caso de estudio del Vivero CENIVAM

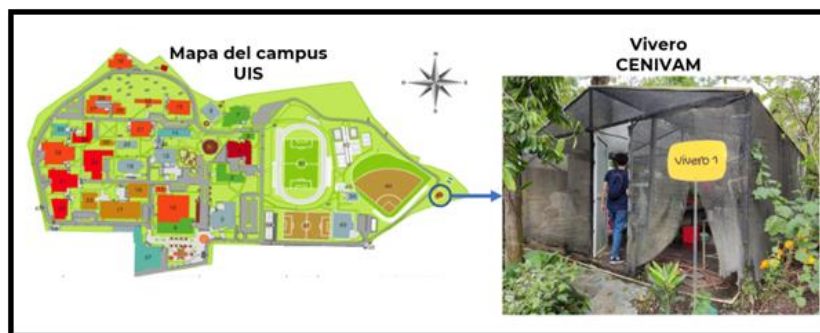
Interesado	Rol	Entidad	Descripción
• Alejandro Ortiz	Ejecutor	<ul style="list-style-type: none"> • UIS • GISEL 	Estudiante de posgrado desarrollando el proyecto de investigación titulado “Diseño de un sistema IIoT de un vivero para la formación de profesionales en competencias de la industria 4.0”
• Angel Ardila	Ejecutor	• UIS	Estudiantes de pregrado desarrollando el trabajo de grado titulado “Diseño de un sistema SCADA basado en IIoT aplicado a un vivero de propagación de plantas”
• Gilbert Delgado		• GISEL	

• GISEL	Ejecutor	• UIS	<p>Ejecutor del proyecto titulado ”Diseño, desarrollo e implementación de una plataforma IIoT para la formación de profesionales en tecnologías de la cuarta revolución industrial”</p> <p>Dueños del vivero que actuará como caso de estudio; en el vivero desarrollan actividades de investigación en torno a la propagación de plantas</p> <p>Aliado en el desarrollo del proyecto titulado ”Diseño, desarrollo e implementación de una plataforma IIoT para la formación de profesionales en tecnologías de la cuarta revolución industrial”</p>
• CENIVAM	Aliado	• UIS	
• DAUTOM	Aliado	• DAUTOM	

• **Descripción del escenario de implementación**

El vivero está ubicado en el edificio 45 CENIVAM alojado en la sede principal de la Universidad Industrial de Santander en la ciudad de Bucaramanga, Colombia (Figura A1). Allí se realizan procesos de investigación integral de especies aromáticas y medicinales colombianas. En evidencia de ello está el Bio Reto XXI 15:50, programa para el cual se tiene como objetivo fortalecer la economía colombiana y aumentar la calidad de la educación superior.

Figura A1
Ubicación del caso de estudio del Vivero CENIVAM



El 9 de mayo de 2022 se realizó una visita al vivero por parte de los estudiantes de pregrado y el estudiante de posgrado con el fin de identificar cuáles eran las necesidades declaradas por el grupo CENIVAM. Durante la visita estuvieron presentes a nombre de CENIVAM los profesionales Cristian Oliveros, Rogerio Saavedra, Miguel Arias y Lina Valencia ver Figura A2.

*Figura A2
visita al Vivero CENIVAM*



Durante la primera visita a las instalaciones del CENIVAM se tuvo la oportunidad de hacer presencia en el vivero: el espacio sobre el cual se basan los proyectos de investigación, generando así unas primeras impresiones junto a una descripción preliminar del estado del vivero. Entre lo observado se destaca que, a causa de las condiciones climáticas y la falta de capas de protección bien establecidas, la infraestructura se encuentra notoriamente deteriorada como se aprecia en la Figura A2 y la Figura A3: en el registro 2 se hace evidente el desgaste en los soportes metálicos debido a la corrosión generada por los factores ambientales; en el tercer registro se detalla cómo el plástico del techo no cumple su labor de cubrir la totalidad de la poli sombra, permitiendo flujo de agua lluvia de forma no monitoreada o planeada por los investigadores a cargo.

CENIVAM hizo expresa su intención de hacerse cargo de reparar los daños actuales, mejorar las condiciones estructurales del vivero y la disposición de recursos para llevar a cabo este trabajo:

se mencionó la posibilidad de una red de internet externa a la red pública de la universidad, una UPS para asegurar suministro de energía en casos de fallas y una red eléctrica trifásica. Estas fueron algunas de las ideas mencionadas, pero se dejó la posibilidad a más opciones según las necesidades de las partes involucradas.

Figura A3
Estado de la infraestructura del vivero

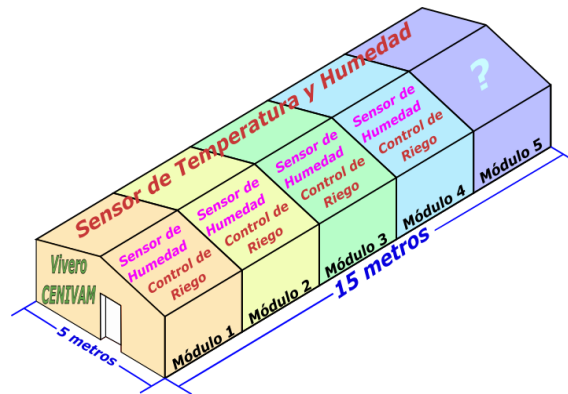


Con respecto a las características físicas y de distribución del vivero, se tiene un espacio de 5 metros por 15 metros y 2 metros de altura a los laterales, donde se evidencian 5 estructuras metálicas que permiten realizar una distribución modular, dando cabida a tener 5 módulos en la totalidad del vivero como se muestra en la Figura A4. En esta primera visita se planteó el uso de 4 de estos 5 posibles módulos con la misma idea de funcionamiento. En cada uno se va a realizar de forma individual el censado de humedad en el sustrato con sus respectivos sensores, y se hará control del riego por medio de unas válvulas accionadas eléctricamente para regular el flujo de agua; así mismo se planteó monitorear la humedad y la temperatura a nivel general en el ambiente.

El quinto módulo quedó abierto a la posibilidad de realizar un espacio de ambiente completamente controlado, con accionabilidad en términos de temperatura y humedad al interior del módulo por medio de un termohigrómetro como adicional a lo que ya se contempla para los

demás módulos; permitiendo así tener un acercamiento mayor al concepto de un invernadero, que implica un ambiente casi o completamente controlado acorde a las variables de interés. Debido a que en los cuatro primeros módulos no se tiene control en humedad ni temperatura en el ambiente, ellos recaen sobre el concepto de vivero.

Figura A4
Medidas y planteamiento inicial de la distribución del vivero



Si embargo, en visitas y comunicaciones posteriores se llegó al consenso de no usar 4 módulos como se habían contemplado antes. En esta última idea de distribución se planteó la automatización de únicamente 3 de los 5 módulos donde se asocia: el método de riego de nebulización, para plantas que están iniciando su proceso de germinación en un módulo; microaspersión en el siguiente módulo, para plantas con sus hojas completamente formadas; y finalmente un módulo con riego por aspersión, para plantas que están en la etapa previa para la salida del vivero. Uno de los módulos restantes se planea destinar como almacén de equipos e insumos y como zona de limpieza.

- **Requerimientos de los interesados**

La identificación de los requerimientos se hará por separado, para que así, en caso de que algunos de los presentados por los distintos interesados no sean compatibles entre sí, se logre llegar

a un consenso en cuanto los avances en términos de logística, económicos, o hasta de conflictos de intereses que se puedan presentar.

CENIVAM:

En el caso de CENIVAM se determina que dentro de las necesidades está lograr automatizar el proceso de riego y la obtención de la información de temperatura y humedad a nivel general en el vivero. Según los procesos que se realizan en cuanto a la propagación de plantas, se identificó en la primera visita que los métodos de riego contemplados inicialmente pueden distribuirse en 4 modos: aspersión, microaspersión, nebulización y goteo según la fase de la planta; motivo por el cual se indicó la posibilidad de distribuir la organización de las plantas en cuatro nódulos.

Sin embargo, luego en una posterior visita le fue informado a los autores de este trabajo que el planteamiento pasa de 4 a 3 módulos donde ya no se contempla el riego por goteo sino por aspersión, microaspersión y nebulización para plantas trasplantadas, germinadas y en el inicio de germinación en su respectivo orden manteniendo para todo caso la humedad entre el 70 y el 80% como valores óptimos para el crecimiento con valores por debajo de 50% o por encima de 90% como valores críticos para la salud de la planta al encontrarse así en el periodo de un día. Los encargados comentan que el rango ideal de humedad es el mismo para todos los módulos, sin embargo, se percibe como buena idea que estos intervalos se puedan modificar asegurando así en todo caso un correcto estado de salud de las plantas.

GISEL:

Dentro de los miembros del grupo de investigación los interesados directos son los estudiantes de pregrado y el estudiante de posgrado. En cuanto a los estudiantes de pregrado, el proyecto se limita a la etapa de diseño, por tanto, no es necesaria la adquisición de equipos ni el montaje para el desarrollo de la investigación siempre y cuando se cumpla el objetivo de Diseñar un sistema SCADA basado en IIoT aplicado a un vivero de propagación de plantas.

Para el desarrollo del proyecto del estudiante de posgrado, sí se hace necesaria la adquisición de equipos y la implementación del sistema con el que se cumpla el objetivo de Diseñar e implementar un sistema IIoT para la monitorización y control de un vivero, que permita la formación de profesionales en competencias de la industria 4.0.

DAUTOM:

Ya que DAUTOM da soporte técnico y especializado, los requerimientos están orientados a dar indicaciones en torno a la adquisición de equipos.

Nota: Dado que los proyectos hacen parte del proyecto “Diseño, desarrollo e implementación de una plataforma IIoT para la formación de profesionales en tecnologías de la cuarta revolución industrial”, las decisiones de compras y diseño estarán limitadas al presupuesto del proyecto, es por este motivo que el soporte de DAUTOM es muy importante.

- Recursos necesarios

Para la implementación del sistema IIoT, se requiere de la adquisición de equipos, reacondicionar el vivero y compra de licencias. A continuación, en la Tabla A2 se describirá parte de los recursos necesarios junto con una descripción de su necesidad y justificación.

Tabla A2

Recursos necesarios.

Recurso	Características	Justificación
Unidad de Procesamiento para ambiente industrial	<ul style="list-style-type: none"> • Motor de comunicación MQTT • Permitir correr una aplicación HMI para la operación del sistema 	La RTU/PLC va a interactuar con las variables de campo a través de transmisores y actuadores.
Sensor Termo higrómetro	<ul style="list-style-type: none"> • Protección al polvo y agua similar a la IP65 • Debe ser posible la calibración con mínima necesidad de mantenimiento. • La señal de salida se requiere que sea de 4-20mA y/o de 0-10V (Depende de la RTU/PLC). 	Para el censado general de humedad y temperatura en los módulos.
Sensores de humedad	<ul style="list-style-type: none"> • Deben ser resistentes a la corrosión. • La señal de salida se requiere que sea de 4-20mA y/o de 0-10V (Depende de la RTU/PLC). 	Para censar la humedad presente en el sustrato de cada uno de los 4 módulos, será uno de los Inputs de información más cruciales para tomar decisiones.

Electroválvulas	<ul style="list-style-type: none">• Corriente de activación limitada por la RTU/PLC• Se debe tener la posibilidad de accionar las 4 formas de riego mencionadas previamente.	Para realizar el control del riego en cada uno de los 4 módulos que puedan ser accionados eléctricamente sin intervención humana directa.
Software de control	<ul style="list-style-type: none">• Estar capacitado para aplicaciones IIoT	Para el desarrollo del proceso IIoT que permita hacer un enlace con la nube
Personal para la implementación	<ul style="list-style-type: none">• Expertos en el área de automatización	Personal de soporte e implementación por parte de DAUTOM.
Personal de acondicionamiento del vivero	<ul style="list-style-type: none">• Conocedores de la visión de CENIVAM	Se debe disponer de un orden claro en los módulos acorde al tipo de plantas y reparar los daños de la estructura al momento de esta visita.

Observaciones

Tras una reunión con el equipo técnico de DAUTOM, se establece que actualmente solo se dispondrá a modo de diseño una distribución del modelo de 4 módulos, dejando para futuras intervenciones el quinto módulo con la idea de una eventual actualización del sistema que se llegue a implementar.

Conclusiones

Al ser un caso de estudio tan amplio con tantas partes participando, se debe tener el compromiso de todas las entidades que tienen un papel de acción en estos proyectos, tener roles claros, establecer y cumplir fechas el desarrollo de cada una de las etapas; sin esto, los proyectos se van a ver afectados, generando atrasos e inconformidad entre los distintos involucrados.

Gracias a esta caracterización y a las reuniones con los participantes se contempla el uso de un OPTO22 RIO MM2, y el manejo del software industrial Ignition 8.1 pues el conjunto de estos dos puede brindar solución completa, y satisfacer la premisa de los estudiantes de pregrado y posgrado.

Se tiene la limitación de los acuerdos que se realicen con el CENIVAM pues son ellos quienes tienen la potestad sobre el vivero, estar siempre en comunicación constante y asertiva con ellos es crucial para el desarrollo del proyecto.

Apéndice B. Información plataformas SCADA

En este anexo se presentan datos relevantes de cada una de las cuatro plataformas SCADA consideradas como opciones en este proyecto, con información general de la plataforma y una tabla en la que se mencionan características relacionadas a cada uno de los factores definidos. La información presentada va dirigida a responder a los factores de conectividad, seguridad, diseño, servicio, costo y acceso definidos previamente.

Tabla B1. Comparativas plataformas SCADA

	mySCADA	SIMATIC WinCC	PcVue	Ignition
Conectividad	- Protocolos Modbus TCP, Modbus Serial, OPC UA	-Protocolos Profibus, Ethernet, Modbus, OPC UA	-Facilita la migración de sistemas previos de otros desarrolladores	-Protocolos SNMP, TCP/IP, MQTT, OPC UA
	-NO soporta Windows 7	-Etiquetas limitadas	-Protocolos LonWorks o BACnet	-Windows, Linux, MacOS o ARM
Seguridad	-Hace uso de VPN	-Control de accesos y roles	-Encriptación TLS, SSL o STFP.	-Manejo de certificados
	-Control de accesos y roles	-Firewall y encriptación SSL, TLS	-Control de accesos y de roles	-Control de accesos y de roles
	-Dispone de Firewall			-Control de tiempos de sesiones
	-Interfaz <i>Drag-and-drop</i>	-Programación en C#, VB.NET, VBS	-Diseño orientado a objetos	-Cuenta con Firewall
Diseño		-Se puede automatizar por	-Generación de reportes	-Los usuarios pueden añadir funciones personalizadas por medio de API o SDK.

	-Crear, importar y editar gráficos o plantillas -Javascript -Bases de datos	medio de funciones o macros	- VBA y SCADA basic -Elementos 2D y 3D	- Interfaz <i>Drag-and-drop</i> -Lenguajes actuales como Python -Visualización nativa en HTML5 y CSS3, así como Apps nativas en iOS y Android
Servicios	-Soporte técnico -Videos y documentos por niveles en su web -No cuenta con certificación oficial	-Asistencia técnica 24/7 -Cursos pagos presenciales y virtuales -Amplia documentación en manuales	-Soporte técnico via web o telefónica -Capacitaciones presenciales -Videos	-Atención telefónica gratuita hasta 90 después de la compra -Soporte vía web gratuito -Amplia variedad de cursos con videos y exámenes gratuitos -Ofrecen certificados pagos -La plataforma de diseño tiene un costo de 1000 USD con clientes y tags ilimitados -El costo va principalmente a módulos que se adicionan según la aplicación -Versión de prueba con todas las funcionalidades activas -Se debe reiniciar un contador cada 2 horas
Costo	-Su versión más básica cuesta 3000 USD el año e incluye 150 tags sin límite de clientes	-Su versión más básica comienza desde 3000 USD con 1500 tags	-El costo básico parte de 2000 USD por una sola licencia y cliente activo	
Acceso	-Tiene versión gratuita con tags limitados	-No ofrece periodo de prueba completa pero sí una parcial que cuenta con	-Para poder acceder tanto a la versión de prueba como a la gratuita	

-Se debe reiniciar el computador después de cierto tiempo en su versión gartuita	recursos ampliamente limitados.	se debe diligenciar un formulario y esperar respuesta.	ilimitadamente sin afectar el proceso de diseño
--	---------------------------------	--	---

Apéndice C. Información relacionada a los sensores

En este apéndice se presentan las tablas que condensan la información considerada al momento realizar la comparativa entre las diferentes opciones de sensores, tanto para sensores de humedad en el sustrato como termohigrómetros.

Tabla D1

Comparativo de algunos sensores de humedad y temperatura en el ambiente.

Nombre	Sensor de humedad en sustrato MAS-1	RS-SD-*-TR-1 Sensor de humedad en sustrato	BGT-SEC-1 sensor de humedad en sustrato
	Link1		
Link	Link2	Link	Link
	Link3		
Salida	4-20mA	RS485/4-20mA/05V/0-10V	0-10V
Potencia de entrada	12-32VDC		12-24VDC
Tiempo de establecimiento	4 Seconds		
Cableado	Cable Rojo: (+) fuente Cable negro: (-) salida Protección: no conectado		
Tipo de sensor	Contenido volumétrico de agua (VWC)		
Rango de medida	0-100 VWC	0-100 VWC	0-100 VWC
Resolución	Depende del dispositivo de adquisición de datos		

Precisión	±6% VWC genérico. Una precisión aumentada puede ser obtenida con una calibración mediana específica	±2% entre 0-50%, @ (sustrato marrón, 30%, 25°C) ±3% entre 50-100%, @ (sustrato marrón, 60%, 25°C)	±3% (0-53%), ±5% (53-100%)
Tiempo de respuesta	1 segundo		<1 segundo
Temperatura de operación	-40 a 60°C	-40 a 60°C	
Dimensiones	8.9cm x 1.8cm x 0.7cm	4.5cm x 1.5cm x 12.3cm	
Cable	5m (default) — otras longitudes disponibles a solicitud	2 meters, longitud de cable personalizado	
Nivel de protección		IP68	IP68
Costo	900.000 COP*	160.000 COP*	165.000 COP*

Nota. * El valor fue convertido de USD a COP y aproximado de acuerdo con una relación 1 USD = 4700 COP. No se consideran costos de importación de los equipos.

Tabla D2

Comparativo de algunos sensores de humedad en sustrato.

Nombre	Transmisor de humedad y temperatura HMS110				Transmisor de humedad y temperatura HMS83				HC2-S3 sonda de humedad y temperatura
Link	Link				Link				Link
Salida	4-20mA				0-10V				0-1V
Voltaje de entrada	20-28VDC	con	600 Ω	10 –	18-35VDC	con	600 Ω	10 –	4-24 VDC pero 12V recomendados
Tiempo de establecimiento	28VDC con 0 Ω 4 segundos				28VDC con 0 Ω				15 segundos
Cableado	La salida es de corriente a dos hilos				Tensión diferencial				Tensión diferencial

Tipo de sensor	Vaisala HUMICAP 180R y Pt1000 RTD Class F0.1 IEC 60751	Vaisala INTERCAP y Pt1000 RTD Class F0.1 IEC 60751	R0TRONIC Hygrometer y PT100 RTD IEC 751 1/3 Clase B
Rango de medida	0-100% RH	0-100% RH	0-100% RH
Resolución	Depende del dispositivo de adquisición de datos	Depende del dispositivo de adquisición de datos	Depende del dispositivo de adquisición de datos
Precisión	±2% RH ±0.01°C	±3% RH ±0.3°C	±0.8% RH ±0.1°C
Intervalo de medida del sensor			
Temperatura de operación	-40 a 60°C	-40 a 60°C	-40 a 100°C
Dimensiones	12.15cm x 20.7cm x 26.42cm	12.15cm x 20.7cm x 26.42cm	1.5 cm de diámetro x 8.3 cm de alto
Cable	AWG 16 max, la longitud del cable puede ser personalizado a solicitud	AWG 16 max, la longitud del cable puede ser personalizado a solicitud	300 metros a 12V o 3m a 5V
Nivel de protección	IP65	IP65	300 metros a 12V o 3m a 5V
Costo	2.700.000 COP*	1.600.000 COP*	2.300.00 COP*

*Nota. * El valor fue convertido de USD a COP y aproximado de acuerdo con una relación 1 USD = 4700 COP. No se consideran costos de importación de los equipos.*

Apéndice D. Plano distribución eléctrica control y potencia

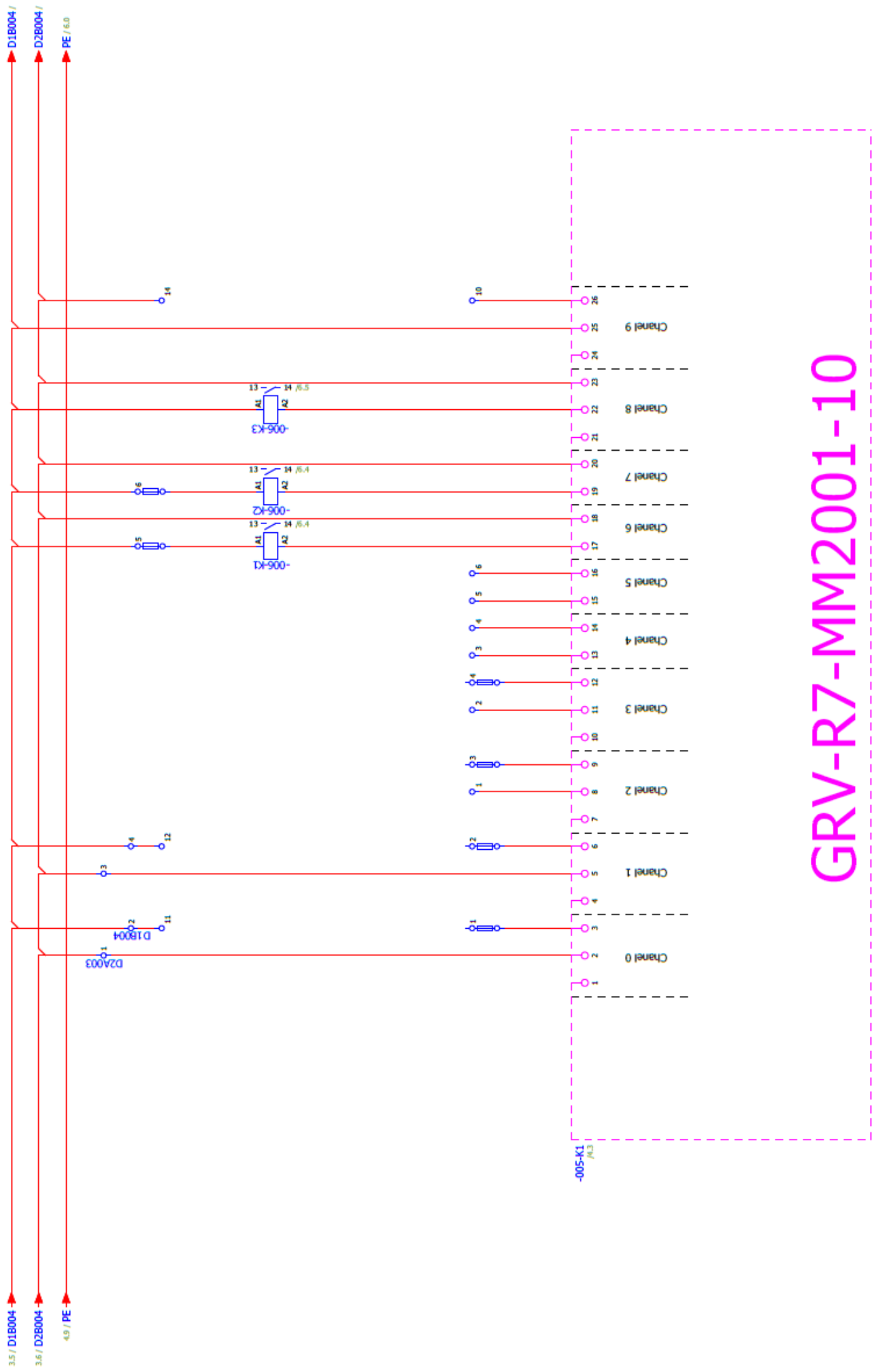
En este apéndice se presenta el plano eléctrico en el cual se debe basar al momento de realizar la implementación del sistema, se contempla tanto el circuito de potencia como el circuito de control:



==+//0

Fecha	23/01/2023	EPLAN	EPLAN GmbH & Co. KG	Alimentación	= VCI + TE1
Resp.	AORIT	Tablero IIoT para la Automatización del Vivero CENVIVAM			
Probado		Sustitución por			
Original		Sustituido por			
Fecha		Nombre			
Cambio					

CENVIVAM_vivero001



Apéndice E. Configuración comunicación por MQTT

El detalle de la configuración del enlace de comunicaciones MQTT, con su enfoque en el servidor, en la plataforma SCADA y en la RTU se presenta a continuación:

Configuración del cliente Hive MQ:

Una de las ventajas adicionales que implica trabajar con este servidor es que su configuración se puede realizar rápidamente de forma intuitiva y sin complicaciones, a continuación, se describe este proceso:

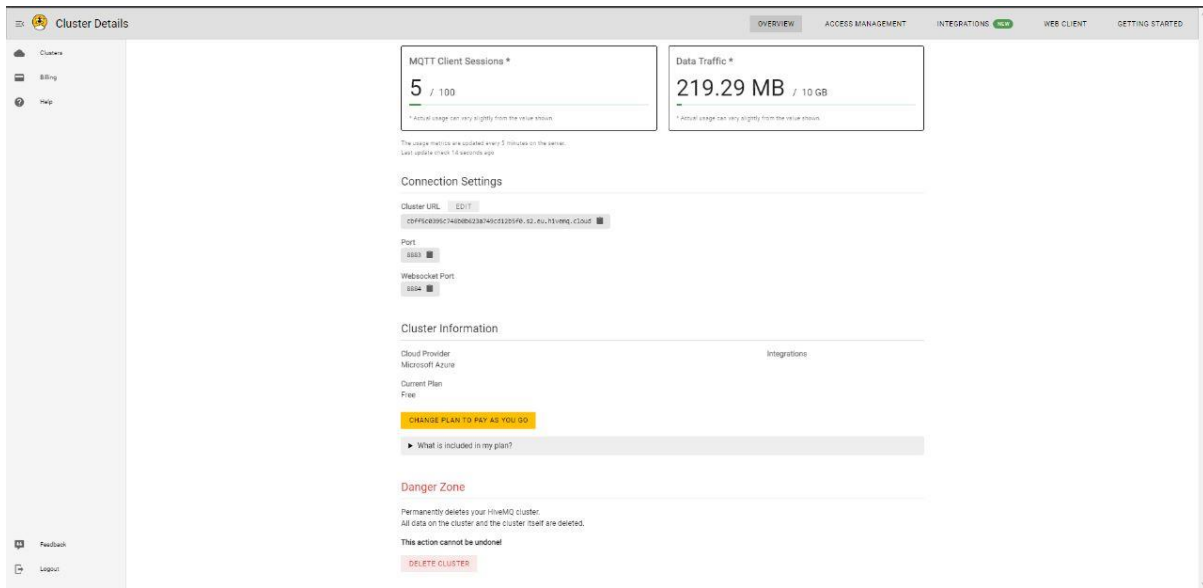
El primer paso para realizar la configuración del servidor MQTT, después de crear la cuenta, es editar el clúster gratuito que aparece por defecto en su versión de prueba por medio del botón *manage cluster* en la interfaz que se presenta por medio de la Figura F 1 a continuación:

Figura F 1. Interfaz inicial Hive MQ



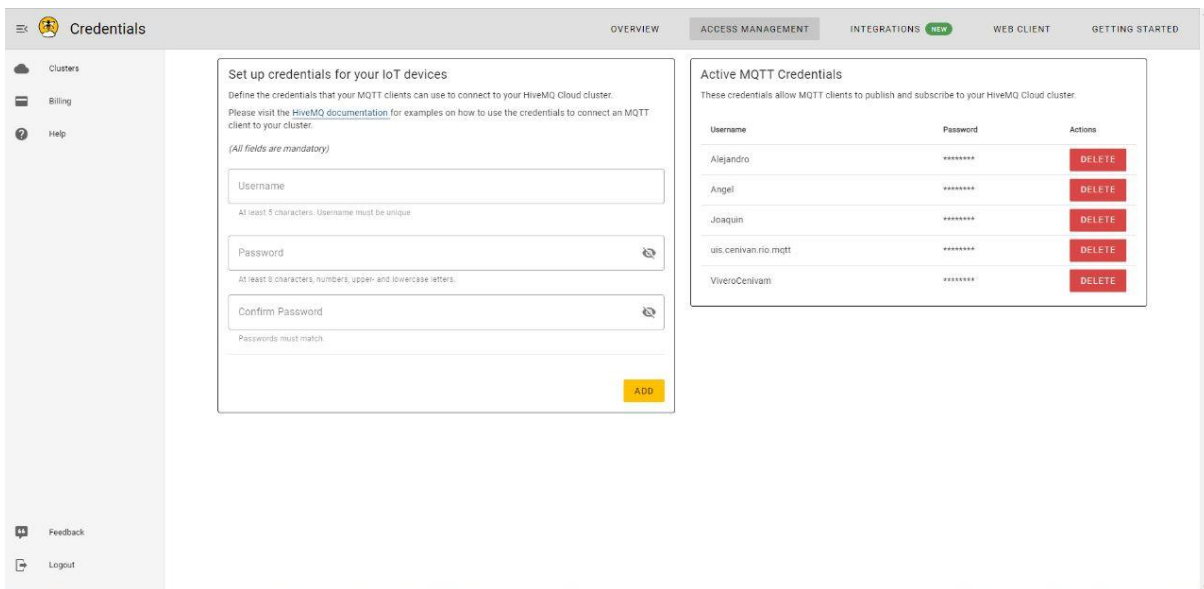
Posterior a esto se tiene en la pestaña de *overview* una vista general del estado actual del servidor indicando el número de clientes asociados, el tráfico de datos que se ha registrado, la dirección del clúster, puertos de enlace y más información como se puede observar en la Figura F 2:

Figura F 2. Información general del cluster seleccionado



En este proceso solo queda configurar los usuarios (o clientes) y sus accesos, con el objetivo de trabajar de una forma más clara y segura. La configuración de éstos se realiza en la pestaña de *Access management* como se puede observar en la Figura F 3:

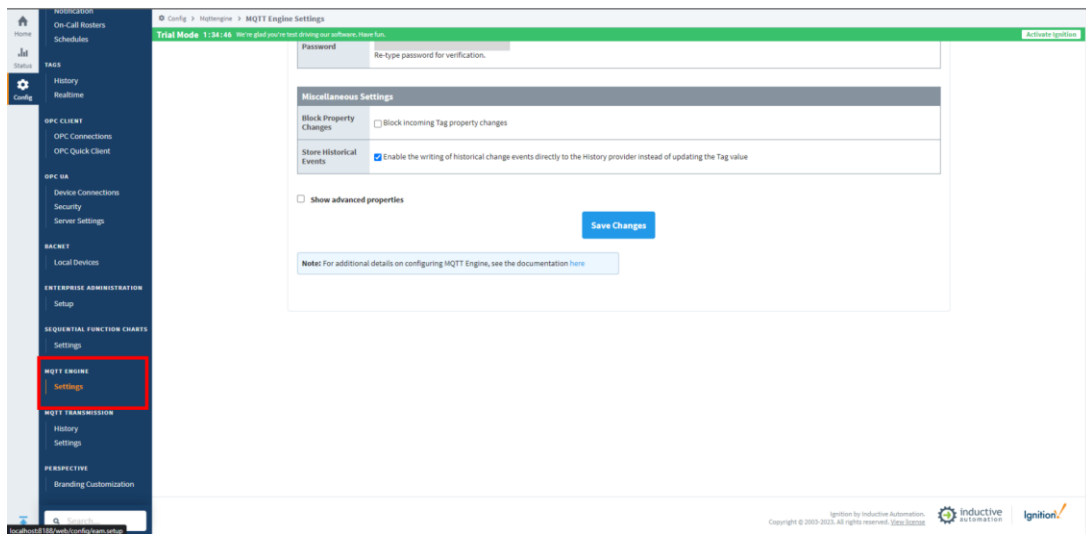
Figura F 3. Pestaña de access management



MQTT Engine Ignition:

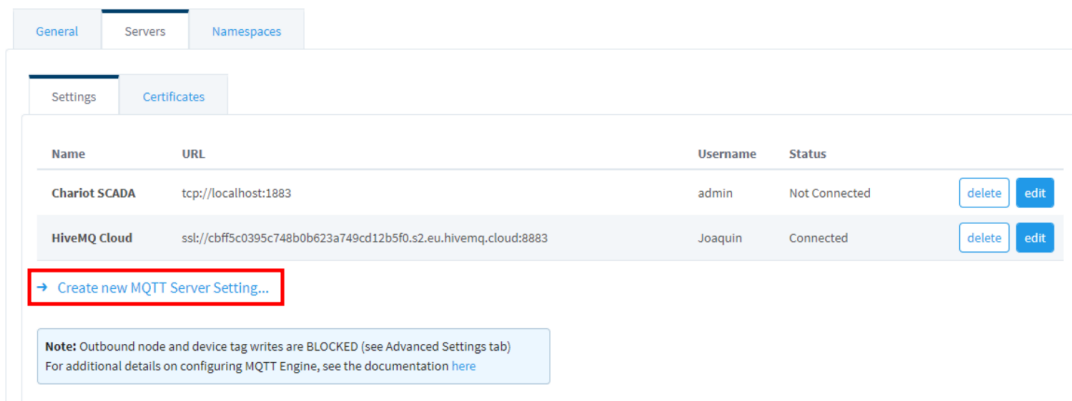
El objetivo de este paso es poder establecer la comunicación que permita la recepción de los datos asociados a las variables que está registrando la RTU desde la plataforma SCADA. Accediendo al cliente de la plataforma SCADA por medio de su versión web, se puede entrar a la configuración del MQTT Engine como lo muestran la Figura F 4:

Figura F 4. Opción MQTT Engine en la configuración de la plataforma SCADA



Seleccionando la pestaña Servers en la subpestaña Settings se ha de seleccionar la opción de crear una nueva configuración de servidor MQTT tal como lo muestra la Figura F5:

Figura F 5. Creación de nueva configuración se servidor MQTT



Después de haber seleccionado esa opción se cambia a la interfaz representada en la Figura F6 donde para completar el proceso en sus campos se ha de configurar siguiendo las anotaciones presentes en dicha figura.

Figura F 6. Configuración de parámetros principales

Main	
Name	<input type="text" value="HiveMQ Cloud"/> The friendly name of this MQTT Server Setting
Enabled	<input checked="" type="checkbox"/> Enable this MQTT Server Setting
URL	<input type="text" value="ssl://cbff5c0395c748b0b623a749cd12f"/> The URL of the MQTT Server to connect to. Should be of the form tcp://mydomain.com:1883 or ssl://mydomain.com:8883 ➡ Poner el servidor
Username	<input type="text" value="Joaquin"/> The username for connections if required by the MQTT Server (optional) ➡ Importante si se está haciendo uso de Sparkplug B
Change Password?	<input type="checkbox"/> Check this box to change the existing password.
Password	<input type="password"/> The password for connections if required by the MQTT Server (optional) ➡ Usuario habilitado desde el servidor MQTT
Password	<input type="password"/> Re-type password for verification.

Apéndice F. Plano de distribución física del vivero

A continuación, se presenta el plano que representa a la distribución física acordada que tendrá el vivero al momento de la implementación de este sistema:

