

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
FACULTAD REGIONAL SANTA FE**

---

**PROYECTO FINAL**

“Hidroponía 4.0: Automatización y digitalización de un sistema hidropónico autocontenido”

**Alumno:** Aicardi, Agustín Andrés (L.U.: 24491)

**Carrera:** Ingeniería Eléctrica

**Director:** Mg. Orué, Matías Waldino

**Codirector:** Dra. Caliusco, María Laura

**Titular de cátedra:** Esp. Ing. Acosta, Javier Andrés

Septiembre de 2024

## Declaración de Responsabilidad

*El contenido, conceptos desarrollados, análisis, conclusiones y opiniones efectuadas en el Informe escrito del proyecto final de carrera son de exclusiva responsabilidad del autor, eximiendo a la Universidad Tecnológica Nacional y los directores de responsabilidad alguna con relación a la obra.*

*La obra es un proyecto académico formulado a título de propuesta, es una instancia formativa del Estudiante desarrollada en el marco de las carreras de Ingeniería de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, por tal motivo la utilización que se realice sobre el contenido de este exime de responsabilidad tanto al autor, como los directores y la propia Universidad.*

## Resumen Ejecutivo

El presente trabajo titulado "Hidroponía 4.0: Automatización y digitalización de un sistema hidropónico autocontenido" se centra en el diseño y la implementación de un sistema hidropónico que automatiza y digitaliza el cultivo de plantas medicinales, específicamente menta, dentro de un entorno controlado. En el contexto de la Industria 4.0, el objetivo principal fue crear un sistema que pudiera regular de manera automática los principales parámetros ambientales que afectan el crecimiento de las plantas, garantizando un control preciso y un registro constante de dichos parámetros.

Para abordar este objetivo, se utilizó el método cascada, que permitió dividir el proyecto en etapas manejables, asegurando que cada fase se completara antes de avanzar a la siguiente. Esta metodología facilitó un desarrollo secuencial, desde la selección y prueba de componentes individuales hasta la integración completa del sistema automatizado y digitalizado.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, logrando la construcción de un sistema hidropónico autocontenido que no sólo controla automáticamente los parámetros clave para el cultivo de las plantas, sino que también incorpora herramientas de digitalización que permiten un seguimiento detallado y en tiempo real de las condiciones de cultivo. Esto representa un avance significativo en la aplicación de tecnologías modernas al cultivo de plantas medicinales, tradicionalmente realizado de manera manual y en condiciones menos controladas.

La importancia de este proyecto radica en su innovación dentro del campo de la hidroponía y su potencial para ser adaptado a diferentes condiciones climáticas y tipos de cultivos. Además, se alinea con los principios de la Industria 4.0, ofreciendo un modelo que puede ser replicado o mejorado en futuros desarrollos tecnológicos.

## Palabras clave

Hidroponía, Industria 4.0, automatización, digitalización.

## Contenido

Declaración de Responsabilidad.....	2
Resumen Ejecutivo .....	3
Palabras clave .....	3
Contenido .....	4
1. Introducción .....	6
2. Marco Teórico .....	7
2.1 Hidroponía .....	7
2.1.1 Ventajas de la hidroponía .....	7
2.1.2 Impacto ambiental de la hidroponía .....	8
2.1.3 Sistema NFT (Nutrient Film Technique) .....	9
2.2 Automatización en la agricultura .....	9
2.2.1 Importancia de regular parámetros ambientales .....	10
2.3 Industria 4.0 .....	11
2.3.1 Activos y el mundo de la información .....	12
2.3.2 Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0) .....	12
2.3.3 Eje de Arquitectura.....	13
2.3.4 – Eje de Ciclo de Vida y Flujo de Valor .....	14
2.3.5 - Eje de Jerarquía.....	16
3 - Fundamentación y justificación.....	17
4 – Objetivos .....	20
4.1 - Objetivo General .....	20
4.2 - Objetivos Específicos .....	20
5 - Metodología .....	21
6 - Diseño del sistema .....	24
7 - Tecnologías utilizadas.....	25
7.1 - Plataformas de desarrollo .....	25
7.2 - Selección de componentes.....	27
7.2.1 - Sensores .....	27
7.2.2 - Actuadores.....	35
8 - Diseño e implementación del sistema de control automatizado .....	39

8.1 - Implementación del software.....	39
8.1.1 - Estructura de funciones de control.....	40
8.1.2 - Control de temperatura PID .....	43
8.1.3 - Verificación de encendido de luces .....	50
9 - Integración de datos y servidor local .....	51
9.1 - Infraestructura de datos.....	52
9.2 - Protocolo de comunicación .....	53
9.3 - Implementación en Arduino .....	53
10 - Digitalización del sistema y creación de su "gemelo digital" .....	54
10.1 - Concepto de gemelo digital.....	54
10.1.1 - Industria 4.0 y gemelos digitales.....	56
10.2 - Ubicación del proyecto dentro de la RAMI 4.0 .....	57
10.3 - Proceso de digitalización .....	59
10.3.1 - Asset Administration Shell (AAS) .....	59
11 - Evaluación del funcionamiento y resultados de las pruebas .....	65
11.1 - Control PID .....	65
11.2 - Envío de datos.....	66
11.3 - Control pH .....	68
11.4 - Asset Administration Shell .....	72
11.5 - Encendido de bomba principal .....	72
12 – Conclusiones y Trabajos Futuros .....	74
12.1 – Conclusiones del trabajo.....	74
12.2 - Recomendaciones y trabajos futuros .....	76
12.1.1 - Instalación de sensores .....	76
12.1.2 - Revisión del control PID.....	76
12.1.3 - Instalación de display local.....	77
12.1.4 - Medir irradiancia .....	77
12.1.5 - Conexión a un punto de tierra común .....	78
12.1.6 - Reinicio automático de Arduino .....	78
13 - Anexos.....	80
14 - Bibliografía .....	86

## 1. Introducción

El presente trabajo se centra en la evolución de un sistema hidropónico autocontenido preexistente, con el objetivo de seleccionar e instalar componentes que permitan su automatización y digitalización. Para lograr esto, se decide utilizar una plataforma de desarrollo que gestiona tanto la automatización del sistema como la recopilación de datos cruciales para su funcionamiento.

La plataforma de desarrollo elegida es Arduino, a la cual se le adiciona una placa Raspberry Pi con un servidor local. Este servidor no sólo procesa las variables relevantes, sino que también da forma a lo que se conoce como “Asset Administration Shell (AAS)”, cumpliendo con la Norma DIN SPEC 91345 (RAMI4.0). Este enfoque asegura que el sistema esté alineado con los estándares de la Industria 4.0, facilitando la integración y el manejo de datos en entornos industriales modernos.

Este trabajo se enmarca en el PID TEUTIFE0007860TC - Modelización de Sistemas Ciberfísicos Inteligentes Aplicados a Biotecnología, con la finalidad de desarrollar un prototipo que permita evaluar el crecimiento de las plantas en un sistema hidropónico automatizado. La intención es no sólo medir el rendimiento actual, sino también identificar áreas de mejora para futuros desarrollos, incluyendo la adición o eliminación de componentes y variables evaluadas.

Este proyecto destaca además por su naturaleza multidisciplinaria. En él participan estudiantes y profesionales de diversas especialidades, tales como Ingeniería en Sistemas de Información, Biotecnología, Ingeniería Mecánica, entre otros. Esta colaboración favorece el enriquecimiento del proyecto con diferentes perspectivas y conocimientos, permitiendo una solución integral y robusta.

En cuanto a las etapas y capas que conforman el sistema de digitalización, el desarrollo del servidor local encargado de la administración de datos bajo el paradigma “edge computing” será responsabilidad del equipo conformado por los estudiantes de Ingeniería en Sistemas de Información, al igual que las capas superiores de la arquitectura RAMI 4.0

El presente trabajo describe, como parte integral del proyecto, la automatización y la planificación del esquema para la digitalización, asegurando que todos los datos necesarios sean capturados y enviados adecuadamente al servidor. Estos datos serán a su vez parte de la información primaria, necesaria para la toma de decisiones del automatismo, permitiendo mantener las variables ambientales dentro del sistema controladas.

## 2. Marco Teórico

Este apartado proporciona el contexto conceptual necesario para entender los fenómenos bajo análisis y guiar la interpretación de los resultados. En las siguientes secciones, se explorarán en detalle los temas y conceptos fundamentales que sustentan este trabajo, comenzando por hidroponía, seguido de la automatización en la agricultura y concluyendo con Industria 4.0.

### 2.1 Hidroponía

La hidroponía es un sistema de cultivo en el cual las plantas crecen en soluciones nutritivas, sin la necesidad de suelo. En este método, las raíces de las plantas están en contacto directo con una solución acuosa que contiene todos los minerales y nutrientes esenciales (Resh, 2013). Este sistema puede usar diversos tipos de sustratos inertes como arena, grava, perlita, lana de roca, entre otros, que sirven únicamente para dar soporte físico a las plantas.

La hidroponía se utiliza tanto en pequeños jardines domésticos como en grandes invernaderos comerciales, permitiendo el cultivo de una amplia variedad de plantas, incluyendo vegetales, frutas, flores y hierbas (Jensen, 1997). La ausencia de suelo permite controlar de manera más precisa el ambiente de crecimiento, optimizando el uso de recursos y mejorando la eficiencia general del cultivo.

#### 2.1.1 Ventajas de la hidroponía

La aplicación de la hidroponía al cultivo ofrece numerosas ventajas significativas. En primer lugar, se destaca la eficiencia en el uso del agua, ya que este método requiere hasta un 90% menos de agua en comparación con la agricultura tradicional. Esto se debe a que el agua en los sistemas hidropónicos se recicla constantemente, lo que reduce el desperdicio y optimiza su uso. Esta característica es especialmente crucial en regiones donde el agua es un recurso escaso, contribuyendo así a la sostenibilidad y conservación de este recurso vital (Resh, 2013).

Otra ventaja importante es el mayor control sobre el entorno de cultivo. Al no depender del suelo, se pueden manejar de manera más precisa las condiciones de crecimiento, tales como la cantidad de nutrientes, el pH del agua, y la exposición a la luz. Este control permite maximizar tanto el rendimiento como la calidad de los cultivos, ajustando los niveles de nutrientes y las condiciones ambientales para satisfacer las necesidades específicas de cada planta (Savvas & Gruda, 2018).

La hidroponía también contribuye a la reducción de plagas y enfermedades, ya que elimina el suelo, que es un medio común para estas. Esto minimiza los riesgos de contaminación y disminuye la necesidad de pesticidas, lo que resulta en la producción de alimentos más saludables y seguros.

Además, las plantas cultivadas en sistemas hidropónicos suelen experimentar un crecimiento más rápido y mayores rendimientos en comparación con las plantas cultivadas en suelo. Esto se debe a la disponibilidad constante y equilibrada de nutrientes, lo que permite una absorción más eficiente y la reducción de factores limitantes, dedicando así más energía al crecimiento y a la producción de frutos (Urrestarazu, 2013).

Por último, la hidroponía requiere menor espacio. Los sistemas hidropónicos pueden diseñarse de manera vertical, optimizando el uso del espacio y permitiendo el cultivo en áreas urbanas o en espacios reducidos. Esto es particularmente beneficioso en entornos urbanos donde el espacio es limitado y costoso, permitiendo la agricultura urbana y local, lo que a su vez reduce la necesidad de transporte y su impacto ambiental asociado (Savvas & Gruda, 2018).

### 2.1.2 Impacto ambiental de la hidroponía

Como se mencionó, la hidroponía ofrece varios beneficios ambientales significativos. Al utilizar menos agua, este método es particularmente valioso en regiones que presentan escasez de esta. Además, la reducción en el uso de pesticidas y herbicidas contribuye a disminuir la contaminación del suelo y del agua. El uso de menos productos químicos también significa menos residuos tóxicos y una menor carga sobre el medio ambiente.

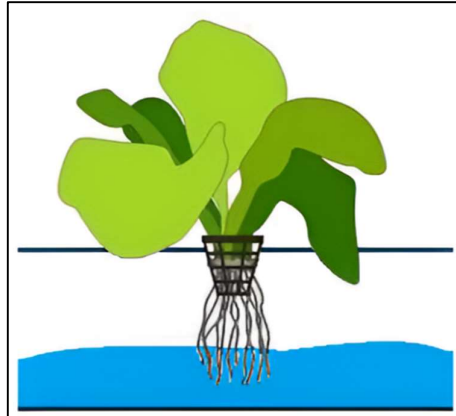
Otro aspecto positivo es la reducción de la huella de carbono. Al permitir el cultivo en ambientes controlados y cercanos a los centros de consumo, se reduce la necesidad de transporte de larga distancia, disminuyendo así las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al transporte de alimentos. Además, los sistemas hidropónicos pueden ser integrados en edificios y áreas urbanas, contribuyendo a la producción local de alimentos y reduciendo la dependencia de la agricultura tradicional.

Sin embargo, la hidroponía no está exenta de desafíos ambientales. La producción y el manejo de los sustratos inertes y la solución nutritiva pueden generar residuos que deben ser gestionados adecuadamente. Además, los sistemas hidropónicos dependen de la energía para mantener el control de las condiciones ambientales, lo que puede aumentar el consumo energético, aunque esto puede ser mitigado mediante el uso de energías renovables (Urrestarazu, 2013). Es importante considerar estas cuestiones para asegurar que la hidroponía sea lo más sostenible posible.



### 2.1.3 Sistema NFT (Nutrient Film Technique)

El Nutrient Film Technique (NFT) es uno de los sistemas hidropónicos más utilizados debido a su eficiencia y simplicidad. En este sistema, las plantas se colocan en canales, generalmente tubos de PVC o de otro material no reactivo, inclinados para permitir el flujo gravitacional de la solución nutritiva desde un extremo del canal hacia el otro. La inclinación asegura que la solución fluya suavemente, proporcionando un suministro constante de nutrientes a las raíces (Aicardi, 2022).



*Figura 1 - Representación del sistema NFT.*

La solución nutritiva se bombea desde un tanque de reserva hasta el inicio de los canales. Luego, la gravedad permite que esta solución fluya en una fina capa sobre las raíces de las plantas, proporcionando constantemente los nutrientes necesarios (Savvas & Gruda, 2018). La delgada capa de solución permite una oxigenación adecuada de las raíces, lo que es crucial para el crecimiento saludable de las plantas.

Por último, la solución nutritiva se recoge al final de los canales y se devuelve al tanque de reserva, donde se ajusta y se recircula. Este proceso continuo asegura que las plantas reciban una dieta equilibrada y constante (Jensen, 1997). Este método también contribuye a la eficiencia en el uso del agua y de los nutrientes, minimizando los desperdicios.

## 2.2 Automatización en la agricultura

La automatización y la tecnología han transformado la agricultura moderna, mejorando significativamente la eficiencia, el rendimiento y la sostenibilidad de las operaciones agrícolas. La integración de sistemas automatizados y tecnologías avanzadas ha permitido a los agricultores optimizar diversas prácticas, como la gestión del riego, el uso de energía y el uso de fertilizantes y pesticidas, contribuyendo a un uso más eficiente de los recursos y a la reducción del impacto ambiental.

En Argentina, el cultivo de plantas medicinales se realiza mayoritariamente de manera tradicional y casera, sin una adopción generalizada de tecnologías avanzadas de automatización. La investigación en este campo revela que, aunque hay un creciente interés en las plantas medicinales debido a sus beneficios terapéuticos, la mayoría de estos cultivos se llevan a cabo en huertos domésticos y no en grandes instalaciones automatizadas.

Un estudio sobre el uso de plantas medicinales en una comunidad semi-rural de la estepa patagónica, en Argentina, muestra que las plantas medicinales se cultivan principalmente en jardines domésticos y pequeñas huertas. Este estudio identificó 30 especies medicinales cultivadas, siendo las más comunes el orégano (*Origanum vulgare* L.), la menta (*Mentha spicata* L.), la cebolla (*Allium cepa* L.) y el ajeno (*Artemisia absinthium* L.) (Eyssartier, Ladio & Lozada, 2009). Este enfoque tradicional limita el potencial de estos cultivos en términos de escalabilidad y control de calidad.

### 2.2.1 Importancia de regular parámetros ambientales

Para optimizar el cultivo de plantas medicinales, es esencial regular varios factores ambientales que influyen directamente en su salud y calidad. Estos factores incluyen el pH, la temperatura, la electroconductividad y la iluminación.

- pH: El pH del medio que se encuentra en contacto con las raíces afecta la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas. Un pH incorrecto puede bloquear la absorción de nutrientes, afectando negativamente el crecimiento y la producción de compuestos activos. El control adecuado es crucial para asegurar que las plantas medicinales reciban los nutrientes necesarios para su desarrollo óptimo.
- Temperatura: La temperatura influye en el metabolismo de las plantas y en la síntesis de compuestos activos. Mantener una temperatura óptima es esencial para asegurar el crecimiento saludable de las plantas y la máxima producción de principios activos medicinales.
- Electroconductividad: La electroconductividad del suelo o de la solución nutritiva indica la cantidad de sales disueltas y la disponibilidad de nutrientes. Una electroconductividad adecuada asegura que las plantas reciban los nutrientes necesarios sin sufrir estrés salino, lo que es fundamental para su crecimiento y calidad.
- Iluminación: La luz es vital para la fotosíntesis, el proceso mediante el cual las plantas producen energía y crecen. La intensidad y calidad de la luz pueden influir en la

producción de metabolitos secundarios, que son los compuestos activos en muchas plantas medicinales.

## 2.3 Industria 4.0

Industria 4.0 tiene como objetivo mejorar la coordinación y colaboración entre objetos técnicos, que incluyen desde elementos tangibles como maquinaria, hasta activos intangibles como los son los softwares y archivos. Estos objetos deben ser representados y conectados virtualmente dentro de una organización. El propósito fundamental es representar digitalmente estos objetos técnicos, cubriendo todos los aspectos desde su desarrollo hasta su eliminación. Esta descripción digital permite el seguimiento y la gestión virtual del objeto a lo largo de su ciclo de vida.

La norma DIN SPEC 91345 (2016) describe un modelo de referencia arquitectónica en forma de estructura de capas cúbicas, proporcionando un marco integral para la gestión de objetos técnicos (denominados activos). Este modelo facilita la descripción, seguimiento y asignación de activos a lo largo de jerarquías técnicas y organizativas durante todo su ciclo de vida.

Se presentan en la Tabla 1 algunos términos y definiciones que deben tenerse en cuenta.

*Tabla 1 - Términos y definiciones en el contexto de la Industria 4.0.*

<b>Términos</b>	<b>Definiciones</b>
Arquitectura	Combinación de elementos de un modelo basado en principios y reglas para su creación y utilización.
Activo (Asset)	Objeto que tiene valor para una organización.
Entidad	Objeto identificable de forma única que se administra en el mundo de la información debido a su importancia.
Mundo de la Información	Ideas, conceptos, algoritmos, modelos y el conjunto de representaciones de objetos físicos y personas en el entorno virtual (también: mundo digital o ciberespacio).
Mundo Físico	Todos los objetos y personas que existen realmente.
Administration Shell	Representación virtual, digital y activa de un componente de la Industria 4.0.
Arquitectura de Referencia	Modelo para la descripción de una arquitectura que generalmente se usa y se reconoce como adecuada (tiene carácter de referencia).

### 2.3.1 Activos y el mundo de la información

Cada activo tiene un valor para una organización. Representa un artefacto diseñado específicamente para desempeñar un propósito particular en un sistema particular.

La tarea clave en la Industria 4.0 es tomar activos del mundo físico y representarlos virtualmente en el mundo de la información.

Lo siguiente se aplica a cada activo:

- Es diseñado, creado, utilizado y desechado;
- Puede ser una idea, un programa de software, un archivo, un servicio o cualquier artículo físico (es decir, no necesariamente tiene que existir en una forma física);
- Tiene un tiempo de vida;
- Es claramente identificable;
- Está representado en el mundo virtual por su Administration Shell;
- Puede tener múltiples representaciones virtuales especificadas según las reglas de la Industria 4.0 para diferentes propósitos;
- Puede combinarse con otros para crear nuevos activos con diferentes propiedades;
- Se caracteriza en un proceso mediante tiempo, ubicación y estado;
- Sus características se describen utilizando el vocabulario de la Industria 4.0, que incluye un conjunto de términos que describen propiedades.

### 2.3.2 Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0)

El Modelo de Arquitectura de Referencia para la Industria 4.0 (RAMI4.0) proporciona una descripción estructurada de los principales elementos de un activo mediante un modelo de niveles que consta de tres ejes, como se muestra en la Figura 2. De esta manera, se pueden descomponer interrelaciones complejas en secciones más pequeñas y manejables, combinando los tres ejes en cada punto de la vida del activo para representar cada aspecto relevante.

Los tres ejes son:

- El eje de Arquitectura (“Layers”), el cual consta de seis capas para representar la información relevante para el rol del activo;

- El eje de Ciclo de Vida y Cadena de Valor (“Life Cycle & Value Stream”) para representar la vida útil de un activo y el proceso de generación de valor, basado en la norma IEC 62890;
- El eje de Niveles Jerárquicos (Hierarchy Levels) para asignar modelos funcionales a niveles específicos, basado en las normas DIN EN 62264-1 (2013) y DIN EN 61512-1 (2011).

El objetivo RAMI4.0 es describir los activos y combinaciones de activos con la precisión suficiente.

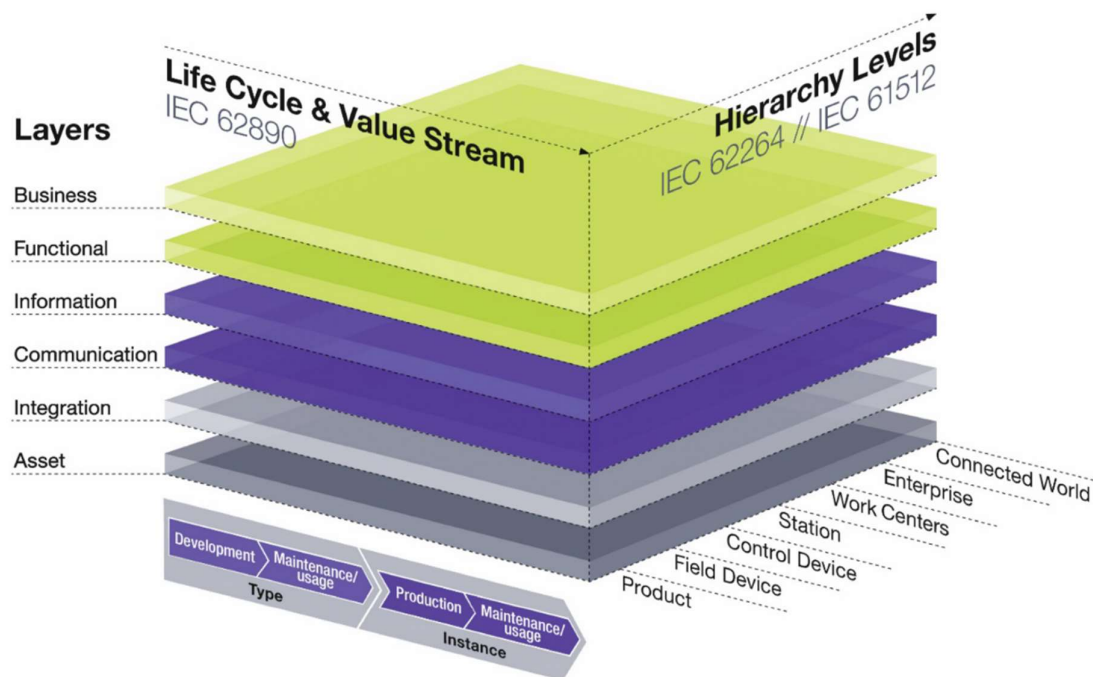


Figura 2 - Esquema tridimensional RAMI 4.0 (DIN SPEC 91345, 2016).

### 2.3.3 Eje de Arquitectura

Este eje vertical divide la arquitectura en seis capas clave, cada una con funciones específicas que abarcan desde los aspectos comerciales hasta los detalles técnicos más finos, las cuales se describen en la Tabla 2.

Tabla 2 - Descripción de las capas del eje de Arquitectura.

Capa	Descripción
Negocios (Business)	Define las condiciones organizativas y comerciales generales, incluyendo modelos de negocio y procesos comerciales resultantes.
Funcional (Functional)	Contiene la descripción lógica de las funciones técnicas de un activo en el sistema de Industria 4.0, incluyendo entornos de ejecución para aplicaciones y funcionalidades técnicas.
Información (Information)	Gestiona los datos generados, utilizados o modificados por las funcionalidades técnicas, asegurando su integración coherente y su persistencia.
Comunicación (Communication)	Facilita el acceso a la información y funciones de un activo conectado por otros activos. En otras palabras, describe qué datos se utilizan, dónde se utilizan y cuándo se distribuyen.
Integración (Integration)	Representa la interfaz entre el mundo físico y el digital, gestionando la infraestructura necesaria para implementar dicha función.
Activo (Asset)	Representa la realidad física del activo, siendo la capa donde los activos reales se integran en el modelo digital.

Estas capas no sólo estructuran el sistema, sino que también definen cómo interactúan los diferentes componentes dentro del entorno digital de Industria 4.0.

### 2.3.4 – Eje de Ciclo de Vida y Flujo de Valor

A lo largo de su vida útil, un activo tiene un estado particular en un momento y en un lugar específicos. Este estado puede describirse con mayor precisión utilizando información adicional. Al observar un activo, se distingue entre tipo e instancia. Dependiendo de cómo se utilice en la cadena de valor, las propiedades y el estado de su tipo o de su instancia específica son relevantes.

#### 2.3.4.1 - Tipo (Type)

El tipo de un activo define la suma de las propiedades que son características de todas las instancias de ese activo en particular. El tipo de un activo es identificable de manera inequívoca y surge con la idea inicial, es decir, cuando se crea, por ejemplo, durante la fase de desarrollo. Esto incluye pedidos, desarrollo y pruebas, hasta la producción de muestras iniciales y prototipos. Una vez que se completan todas las pruebas requeridas para la validación, se libera el tipo para la producción en serie, lo que significa que se pueden producir instancias de ese tipo.

A su vez esta categorización se subdivide en dos, Desarrollo y Uso/Mantenimiento.

#### 2.3.4.1.1 - Desarrollo (Development)

Esta subcategoría se refiere a la fase de desarrollo del tipo de activo. Aquí se establecen las especificaciones, el diseño y los estándares para el tipo de producto o sistema que se va a crear. Incluye actividades como la investigación, el diseño conceptual y la ingeniería, donde se definen las propiedades y funcionalidades generales del tipo de activo.

#### 2.3.4.1.2 - Uso/Mantenimiento (Usage/Maintenance)

En esta subcategoría, se abordan las prácticas de uso y mantenimiento del tipo de activo. Aunque se trata de una abstracción del activo en uso, se consideran aquí los aspectos relacionados con su funcionamiento en operación y los procedimientos necesarios para mantener su desempeño a lo largo del tiempo.

#### 2.3.4.2 - Instancia (Instance)

Una instancia es un activo específico, identificable de manera inequívoca, que se caracteriza por las propiedades de un tipo. Una instancia siempre tiene una relación inequívoca con su tipo.

Para un activo físico, se crean activos concretos en la producción sobre la base del tipo. Cada activo fabricado representa una instancia de un tipo y puede ser utilizado. Las instancias pueden ser vendidas, entregadas a los clientes, utilizadas por los clientes y mantenidas.

Al igual que con tipo, esta etapa del ciclo de vida se divide en otras dos, Producción y Uso/Mantenimiento.

#### 2.3.4.2.1 - Producción (Production)

Dentro de la categoría Instancia, la subcategoría Producción se centra en la producción o fabricación de una instancia específica del activo. Esta fase incluye la manufactura real, el ensamblaje, la configuración, y cualquier personalización necesaria para crear un activo concreto basado en las especificaciones definidas en la fase de desarrollo.

#### 2.3.4.2.2 - Uso/Mantenimiento (Usage/Maintenance)

En la subcategoría Uso/Mantenimiento dentro de la Instancia, se refiere al uso real y mantenimiento de una instancia específica del activo. Aquí no solo se utiliza el activo, sino que se monitorea y gestiona su rendimiento durante su ciclo de vida operativo, asegurando que se mantenga en condiciones óptimas a través de procedimientos de mantenimiento preventivo o correctivo.

### 2.3.5 - Eje de Jerarquía

El eje de jerarquía en RAMI 4.0 establece una estructura organizativa que asigna funciones y responsabilidades a diferentes niveles dentro de una organización o sistema industrial. Estos niveles están diseñados para facilitar la integración fluida y eficiente de los activos y procesos en el entorno digital de Industria 4.0:

- **Producto (Product):** Representa el producto final que se fabrica como parte integral de un proceso de valor en Industria 4.0. Define cómo los productos individuales contribuyen al valor agregado dentro de la cadena de producción, desde la concepción hasta la entrega.
- **Dispositivo de Campo (Field Device):** Refleja la descentralización y capacidad de autogestión de dispositivos dentro de los entornos industriales modernos, como sensores y actuadores que operan en la periferia de la red digital.
- **Dispositivo de Control (Control Device):** Define los dispositivos responsables de la gestión y supervisión directa de los activos físicos en el entorno industrial, optimizando las operaciones y garantizando la eficiencia.
- **Estación (Station):** Representa una ubicación específica dentro del entorno industrial donde se agrupan y coordinan múltiples activos y recursos para realizar funciones específicas dentro de un proceso de producción o servicio.
- **Centros de Trabajo (Work Centers):** Agrupan recursos y activos que realizan tareas específicas dentro de un proceso de producción o servicio más amplio, facilitando la coordinación y optimización de operaciones.
- **Empresa (Enterprise):** Define el nivel organizacional más alto dentro de la estructura, donde se gestionan estratégicamente los recursos, las operaciones y la dirección general de las actividades industriales.
- **Mundo Conectado (Connected World):** Descripción de las relaciones entre diferentes activos o combinaciones de activos, como redes de fábricas o sistemas de producción distribuidos. Facilita la comunicación y colaboración entre entidades para una operación coordinada y eficiente.

Cada nivel en el eje de jerarquía cumple roles y funciones específicos que contribuyen a la operación global y la optimización de los sistemas de producción en la Industria 4.0. Esta estructura asegura que los activos y los datos puedan fluir de manera eficiente a través de



diferentes niveles y contextos operativos, mejorando así la flexibilidad y la capacidad de respuesta de las organizaciones industriales.

### 3 - Fundamentación y justificación

El desarrollo de un sistema automatizado para el cultivo hidropónico de plantas medicinales surge por la necesidad de conocer y regular los parámetros ambientales en los que una planta se desarrolla. Actualmente, se cuenta con un sistema hidropónico listo para funcionar, pero su control manual limita la precisión y la optimización de las condiciones de crecimiento. La introducción de la automatización en este proceso es innovadora y busca aprovechar los avances tecnológicos para lograr un cultivo más detallado y eficiente.

El enfoque de este proyecto se basa en la selección de sensores y sistemas de tratamiento de bajo costo, que permitan la monitorización y el control de los parámetros ambientales claves, tales como la temperatura, la iluminación y el pH. La implementación de estos componentes de automatización no solo mejorará la precisión y la estabilidad de las condiciones de cultivo, sino que también permitirá la recopilación de datos digitales valiosos para su análisis y toma de decisiones.

La modelización del sistema y la aplicación de criterios de control clásico son elementos fundamentales en este proyecto. La utilización de los conceptos de transformación digital e Industria 4.0 permitirá tener un modelo representativo del sistema y todas sus variables, y los algoritmos de control permitirán ajustar los parámetros ambientales de manera óptima, brindando a las plantas medicinales las condiciones ideales para su crecimiento y desarrollo. Este enfoque garantiza la adaptabilidad del sistema a diferentes especies y abre la puerta a futuras investigaciones y experimentaciones en el ámbito de la agronomía.

La integración de las mediciones de los sensores en un sistema de información completo es otro componente esencial de este proyecto. Los datos recopilados se transmitirán a través de una red informática hacia un servidor, donde serán almacenados y estarán disponibles para futuros análisis. Esta infraestructura permitirá tener acceso remoto a la información en tiempo real, posibilitando un monitoreo exhaustivo y una toma de decisiones informada para el óptimo desarrollo de las plantas medicinales.

La importancia de este proyecto radica en su carácter innovador y en la respuesta directa a la necesidad de mejorar la calidad y el control en el cultivo de plantas medicinales. La aplicación de conceptos de transformación digital e Industria 4.0, como la automatización, la digitalización y la integración de datos, potenciará la eficiencia y la rentabilidad del cultivo hidropónico, abriendo nuevas oportunidades en el ámbito de la agronomía y la investigación

de plantas medicinales. Asimismo, este proyecto brinda la oportunidad de fusionar el conocimiento tecnológico y agrícola para impulsar la investigación interdisciplinaria y el avance científico.

El proyecto aquí propuesto se enmarca en las siguientes competencias generales (CG) y específicas (CE)

- CG2: Concebir, diseñar y desarrollar proyectos de ingeniería.
- CG4: Utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de aplicación en la ingeniería.
- CG5: Contribuir a la generación de desarrollos tecnológicos y/o innovaciones tecnológicas.
- CG8: Actuar con ética, responsabilidad profesional y compromiso social, considerando el impacto económico, social y ambiental de su actividad en el contexto local y global.
- CE1.1: Desarrollar y aplicar metodologías de proyecto, cálculo, diseño y planificación de sistemas, e instalaciones de generación, conversión, transmisión, distribución, supervisión, automatización, control, medición y utilización de energía eléctrica, respetando criterios técnico-económicos, de eficiencia energética y de sustentabilidad.
- CE9.1: Diseñar programas que permitan calcular y simular equipos, sistemas, e instalaciones de generación, conversión, transmisión, distribución, supervisión, automatización, control, medición y utilización de energía eléctrica, empleando algoritmos numéricos, equipos de computación, tecnología de la información y comunicación.

La Industria 4.0 se ha convertido en un elemento clave para la competitividad y la innovación en el panorama industrial actual. Su capacidad para digitalizar, automatizar e interconectar los procesos de producción brinda beneficios significativos en términos de eficiencia, calidad, toma de decisiones y adaptabilidad.

Como deleva el título del proyecto, tanto la automatización como la aplicación de conceptos de Industria 4.0 se realizarán sobre un sistema hidropónico autocontenido, el cual responde a la Competencia General 8 (CG8): Actuar con ética, responsabilidad profesional y compromiso social, considerando el impacto económico, social y ambiental de su actividad en el contexto local y global.

Por otro lado, hidroponía es un método de cultivo sin suelo que ha adquirido una gran relevancia en los últimos tiempos debido a sus numerosos beneficios y su capacidad para superar los desafíos de la agricultura tradicional.

En primer lugar, la hidroponía utiliza menos agua en comparación con el método convencional, lo que la convierte en una opción más sostenible en un momento en que la escasez de agua es una preocupación global. Además, permite un control preciso de los nutrientes y las condiciones de crecimiento de las plantas, lo que conduce a un crecimiento más rápido y saludable.

Al eliminar el uso de suelo, se reducen los problemas relacionados con enfermedades y plagas del suelo, reduciendo la necesidad de pesticidas y herbicidas. También, ofrece una mayor flexibilidad en términos de ubicación y una menor superficie para una misma cantidad de plantas con respecto a la agricultura tradicional.

El término “autocontenido” hace referencia a que el sistema estará aislado del medio ambiente, lo que permite utilizarlo frente a distintas condiciones climáticas e incluso, dentro de una edificación.

Con todos los datos que se recolectarán, se propone la creación de un gemelo digital, como réplica virtual del sistema físico, lo cual, entre las ventajas que presenta, destacan:

- Simulación y análisis: Permite simular y analizar el comportamiento de un sistema en un entorno virtual antes de implementarlo en el mundo real, lo que ayuda a identificar y corregir posibles problemas o mejorar el rendimiento.
- Soporte para la toma de decisiones: Facilita la toma de decisiones informadas al proporcionar datos y análisis detallados sobre el rendimiento y el comportamiento de sistemas y procesos.
- Optimización de procesos: Facilita la optimización de procesos al permitir la experimentación con diferentes configuraciones y ajustes sin necesidad de realizar cambios directamente en el sistema físico.
- Análisis de rendimiento: Permite realizar un seguimiento del rendimiento en tiempo real y analizar datos históricos para identificar áreas de mejora y tomar decisiones informadas.
- Entrenamiento y formación: Proporciona un entorno seguro y controlado para entrenar y formar a operadores y personal técnico en el manejo de equipos y procesos más complejos.

## 4 – Objetivos

### 4.1 - Objetivo General

- Desarrollar una propuesta de automatización y digitalización de un sistema hidropónico autocontenido siguiendo los principios de la Industria 4.0.

### 4.2 - Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar un sistema de control automatizado que permita regular de manera precisa y eficiente los parámetros ambientales del cultivo hidropónico, como la temperatura, el pH y la electroconductividad.
- Investigar y seleccionar los componentes eléctricos de bajo costo necesarios para la automatización del sistema de hidroponía.
- Investigar e implementar soluciones de bajo costo que sean compatibles con los principios de la Industria 4.0, buscando reducir los costos de implementación y hacer accesibles las tecnologías de automatización y digitalización.
- Desarrollar un modelo digital del sistema hidropónico autocontenido.
- Disponer datos de sensores a un sistema de monitoreo remoto que permita al usuario acceder y visualizar los datos en tiempo real a través de una interfaz amigable, facilitando el seguimiento y la toma de decisiones basadas en la información recolectada (esta interfaz será desarrollada por el equipo de alumnos de Ingeniería en Sistemas participantes del proyecto).

## 5 - Metodología

El proyecto se llevó a cabo con el objetivo de desarrollar una automatización para un sistema hidropónico autocontenido y proponer la digitalización de este en el marco de la Industria 4.0.

Para este trabajo en particular se eligió utilizar el método cascada, el cual se denomina así porque las fases del proyecto fluyen de manera descendente de una a la otra y cada una debe completarse antes de que comience la siguiente, sin solaparse. Esto permitió dividirlo en tareas más pequeñas, como se muestra en la Figura 3, y estructurarlo de manera clara, facilitando la planificación y la gestión.

Partió con una definición clara de requisitos, algunos de los cuales fueron impuestos por el Proyecto de Investigación y Desarrollo en el que se inscribe este trabajo, mientras que otros se identificaron a través de una revisión bibliográfica exhaustiva. Esta revisión permitió comprender mejor el tema, identificar las necesidades específicas, y establecer un marco de trabajo que guiaría las siguientes fases del proyecto.

Con los requisitos claramente establecidos, el diseño del proyecto se dividió en dos grandes fases: automatización y digitalización. Durante la fase de automatización, se investigaron los componentes que podían ser incorporados, evaluando sus características y revisando si existían registros que documenten haber sido previamente implementados en sistemas hidropónicos. En la fase de digitalización, se planificaron las tareas a realizar una vez completada la fase de automatización, asegurando que esta se integrara de manera efectiva con los componentes automatizados.

Para cada componente seleccionado, se realizaron pruebas individuales, en las cuales se construyeron pequeños prototipos que permitieron evaluar su funcionamiento y respuesta. Esta etapa de pruebas permitió verificar que cumplían con los requisitos establecidos y que, al integrarse en el sistema global, funcionarían correctamente.

El enfoque de trabajo fue incremental, donde cada módulo fue desarrollado y probado por separado antes de ser integrado en el sistema completo. Esto garantizó que cualquier problema pudiera ser identificado y corregido en una etapa temprana.

Una vez que todos los componentes fueron instalados, se llevó a cabo una prueba integral del sistema para verificar que todas las partes trabajaran juntas de manera armónica. Aunque se identificaron algunos ajustes menores, estos fueron solucionados antes de proceder a la fase final del proyecto.

Se enfrentaron algunos desafíos, como la falta de ciertos sensores, que fueron reemplazados por componentes alternativos que simulaban las mediciones necesarias. Esto permitió seguir adelante con las pruebas y garantizar que el sistema respondiera adecuadamente.

Teniendo todos los componentes instalados se unificaron coordinadamente todos los códigos individuales que los hacían funcionar, para lograr uno que integre a todas las partes del sistema.

Con este código se identificaron todos los parámetros y variables de interés para la digitalización, con el fin de no dejar ningún dato relevante fuera. Estos datos permitieron crear la estructura del gemelo digital, la cual es utilizada por los alumnos de Ingeniería en Sistemas de Información en su proyecto final para hacerlo funcionar.

Completadas las etapas de automatización y digitalización, el proceso de pruebas culminó con una evaluación del sistema completo, confirmando que cumplía con los objetivos propuestos.

El método de cascada fue seleccionado debido a la naturaleza secuencial y estructurada del proyecto. Esta metodología permitió dividir el trabajo en fases claramente definidas, facilitando la gestión y el desarrollo del proyecto. Sin embargo, se reconoció que una limitación inherente de este enfoque es la imposibilidad de avanzar a la siguiente fase si una etapa presenta problemas. A pesar de las dificultades encontradas, el método fue adecuado para este proyecto debido a su enfoque sistemático y la necesidad de un desarrollo secuencial.

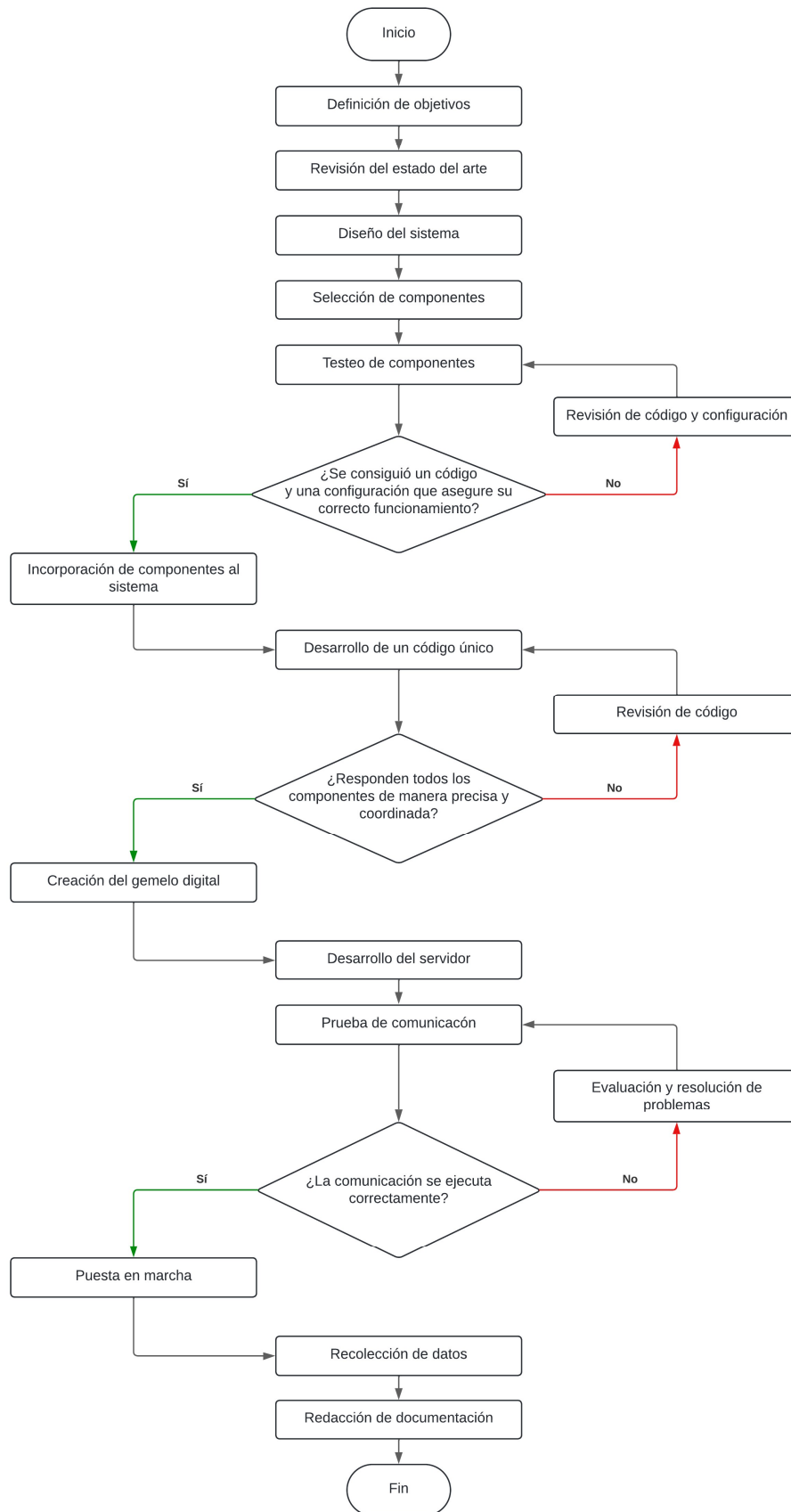


Figura 3 – Diagrama de flujo del proyecto.

## 6 - Diseño del sistema

El diseño del sistema se ha realizado teniendo en cuenta la información recolectada en el mapeo sistemático de la literatura (Aicardi, 2022) y posteriores recomendaciones brindadas por los especialistas en biotecnología que forman parte del proyecto de investigación y desarrollo.

Una representación del sistema hidropónico autocontenido mediante un software de diseño se exhibe en la Figura 4 (Mattei et al., 2022).

Del lado izquierdo se aprecia el gabinete sin sus puertas y, del lado derecho, se muestran las principales partes del sistema con algunos de sus actuadores. Cada uno de los estantes cuenta con dos luces LED, tres ventiladores y espacio para cultivar 15 plantas.

En la parte inferior se logran apreciar un total de cinco contenedores. En el de mayor tamaño se encuentra el fluido que es recirculado por todos los tubos y donde se realiza la mezcla de los nutrientes y los reguladores de pH, alojados en los cuatro tanques secundarios.

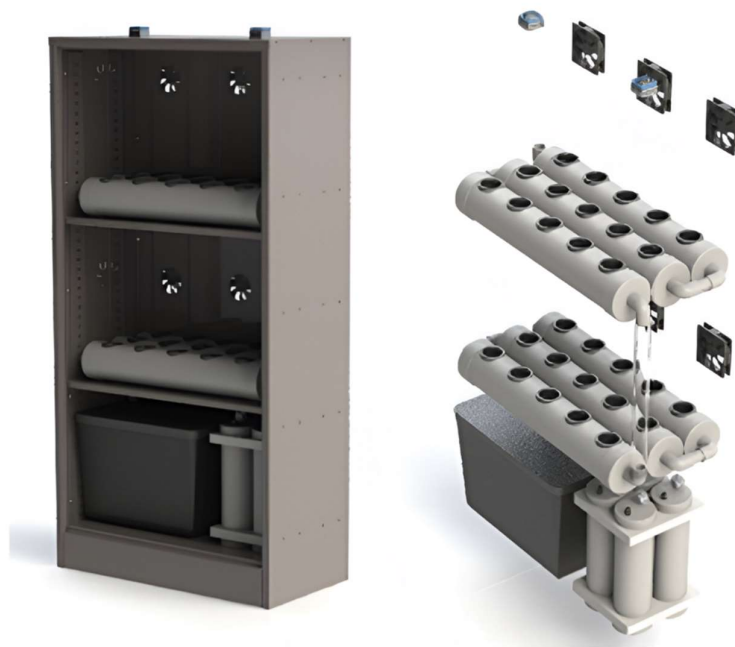


Figura 4 - Representación 3D del sistema (Mattei et al., 2022).





*Figura 5 - Fotografía del Sistema Hidropónico Autocontenido.*

## 7 - Tecnologías utilizadas

En cualquier proyecto de desarrollo, la elección de tecnologías adecuadas juega un papel fundamental en el éxito del mismo. Desde la selección de la plataforma de desarrollo hasta la elección de sensores y actuadores, cada componente fue seleccionado para asegurar su compatibilidad y eficiencia dentro del sistema en el que se integrará. En esta sección se detallan las tecnologías empleadas, mencionando sus características y cómo contribuyen al funcionamiento general del proyecto.

### 7.1 - Plataformas de desarrollo

La plataforma de desarrollo seleccionada para este proyecto es Arduino, una opción altamente valorada en el ámbito de la electrónica y la robótica por su naturaleza de código

abierto, su amplia difusión y su accesibilidad económica. Arduino se destaca como una herramienta flexible y poderosa que facilita la creación de prototipos y proyectos interactivos de manera eficiente y efectiva.

La placa Arduino Mega 2560 ha sido elegida específicamente para este proyecto debido a sus características avanzadas, que la hacen ideal para manejar una gran cantidad de dispositivos y sensores simultáneamente. Esta placa está equipada con el microcontrolador ATmega2560 de Microchip y ofrece 54 pines de entrada/salidas digitales, 16 entradas analógicas y una memoria flash de 256 KB. Además, cuenta con 8 KB de SRAM y 4 KB de EEPROM, proporcionando una capacidad amplia para el almacenamiento de programas y datos. Incluye también cuatro puertos UART (puertos seriales de hardware), un oscilador de cristal de 16 MHz, conexión USB, conector de alimentación, un cabezal ICSP y un botón de reset. Estas características permiten una integración extensa y compleja de componentes electrónicos y módulos adicionales, proporcionando flexibilidad y escalabilidad en el diseño del proyecto.

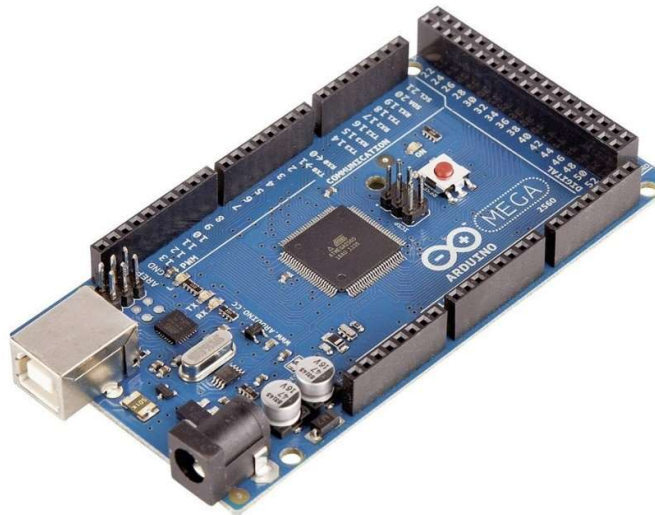


Figura 6 - Arduino Mega 2560.

Como ya se mencionó, otra ventaja significativa de Arduino Mega es su naturaleza de código abierto, lo que permite a los usuarios acceder al diseño completo de hardware y software. Esto fomenta la innovación y la colaboración en la comunidad, permitiendo modificar y mejorar el diseño según necesidades específicas. Además, la comunidad de Arduino es extensa y activa, facilitando el acceso a una gran cantidad de recursos educativos, tutoriales y ejemplos disponibles en línea.

Otro aspecto destacable del Arduino Mega 2560 es su costo competitivo en comparación con otras soluciones similares en el mercado. Esto permite que sea una opción asequible para

estudiantes, entusiastas y profesionales que desean explorar y desarrollar proyectos de electrónica y robótica sin comprometer la calidad ni incurrir en gastos excesivos en hardware.

Dicha placa fue programada mediante el entorno de desarrollo integrado (IDE por sus siglas en inglés) de Arduino, notable por su facilidad de uso y su capacidad para soportar múltiples plataformas, incluyendo Windows, macOS y Linux. El IDE de Arduino simplifica la escritura, carga y depuración de código en lenguajes como C y C++, facilitando a los desarrolladores la implementación de sus ideas sin preocuparse por la complejidad del hardware subyacente.

## 7.2 - Selección de componentes

La selección de los componentes electrónicos que integran este sistema se realizó con el objetivo de satisfacer los requerimientos específicos del presente proyecto.

En primer lugar, es fundamental obtener datos precisos sobre parámetros críticos como el nivel de pH, la electroconductividad, la temperatura y la humedad. Estos datos no solo deben ser recopilados de manera eficiente, sino que serán utilizados como base para la regulación de los parámetros mencionados, con el objetivo de mantener las condiciones óptimas del sistema. La capacidad de monitorear y ajustar estos factores es esencial para asegurar la digitalización y automatización del sistema, lo que permitirá un control más preciso y una mejor gestión de los recursos.

En segundo lugar, su implementación debe ser una solución de bajo costo. Esto implica la selección de componentes que, además de cumplir con los requisitos técnicos, sean económicamente viables. La relación costo-beneficio de cada componente fue cuidadosamente evaluada para asegurar que el proyecto no solo sea funcional y eficiente, sino también accesible desde un punto de vista financiero.

La combinación de estos criterios, la precisión en la obtención de datos y la regulación de los parámetros, junto con la viabilidad económica, garantiza que el sistema no solo cumpla con los objetivos técnicos, sino que también sea sostenible y replicable en diferentes contextos.

### 7.2.1 - Sensores

En el presente proyecto, se ha seleccionado una variedad de sensores para medir y monitorear diferentes parámetros críticos del sistema hidropónico.

La conexión de estos con un microcontrolador permite una automatización avanzada del sistema, optimizando el crecimiento y la salud de las plantas, y la recolección de datos para su futura integración al modelo de Industria 4.0.

A continuación, se detallan los sensores elegidos, destacando su principio de funcionamiento y características técnicas.

#### 7.2.1.1 - Medición de pH

Para la medición de pH se ha elegido el sensor de pH PH-4502C + Sonda de Medición E-201-C.

El principio de funcionamiento se basa en la electroquímica. La sonda de medición E-201-C está compuesta por un electrodo de vidrio sensible al pH y un electrodo de referencia. Cuando la sonda se sumerge en una solución, el electrodo de vidrio permite el paso de iones de hidrógeno, creando un potencial eléctrico que varía según la concentración de estos iones en la solución.

Este potencial eléctrico generado por la interacción de los iones de hidrógeno con el electrodo de vidrio es comparado con el potencial constante del electrodo de referencia. La diferencia de potencial entre estos dos es proporcional al pH de la solución, y esta diferencia es convertida en una señal eléctrica que puede ser medida y registrada.

El sensor PH-4502C interpreta esta señal eléctrica y la convierte en una señal analógica que puede ser leída por un microcontrolador como el Arduino. Además, incluye un circuito de acondicionamiento de señal que amplifica y filtra la señal eléctrica, asegurando una alta precisión y estabilidad en las mediciones.

La calibración del sensor se realiza mediante soluciones buffer de pH conocido, lo que permite ajustar el dispositivo para obtener lecturas precisas y fiables en todo el rango de medición.

*Tabla 3 - Características adicionales del sensor PH-4502C*

Tensión de alimentación	Corriente	Rango de pH	Rango de temperatura	Tiempo de respuesta y estabilización
5 V DC $\pm$ 0,2 V	5 - 10 mA	0 - 14	0 - 80°C	5s / 60s



Figura 7 - Sensor PH-4502C + Sonda de Medición E-201-C.

Esta es una propuesta de selección de sensor, ya que, al momento de la redacción de este documento, no se ha adquirido aún.

#### 7.2.1.2 - Medición de electroconductividad

El sensor elegido para la medición de esta variable es el KS0429 Keyestudio TDS Meter V1.0.

El principio de funcionamiento se basa en la conductividad eléctrica. La sonda de medición está compuesta por dos electrodos que se sumergen en una solución acuosa. Cuando se aplica una tensión eléctrica alterna entre estos electrodos, los iones presentes en la solución conducen la corriente eléctrica, permitiendo que el sensor mida la conductividad eléctrica del agua.

Esta conductividad eléctrica generada por la interacción de los iones con los electrodos es proporcional a la concentración de sólidos disueltos en la solución. A mayor cantidad de sólidos disueltos, mayor será la conductividad eléctrica. La señal eléctrica obtenida de esta interacción es medida y registrada por el sensor.

El sensor interpreta esta señal eléctrica y la convierte en una lectura de TDS (Total de Sólidos Disueltos), medida en partes por millón (ppm). El sensor incluye un circuito que ajusta y calibra la señal eléctrica, asegurando una alta precisión y estabilidad en las mediciones.

La calibración del sensor se realiza utilizando soluciones de referencia con valores de TDS conocidos. Esto permite ajustar el dispositivo para obtener lecturas precisas y fiables, garantizando que las mediciones reflejen correctamente la concentración de sólidos disueltos en diversas soluciones acuosas.

La cantidad de sólidos disueltos en la solución brinda información acerca de los nutrientes que se encuentran disponibles y permite alertar cuando deben agregarse por ser insuficientes.

Tabla 4 - Características adicionales del sensor KS0429 Keyestudio TDS Meter V1.0.

Tensión de alimentación	Corriente	Rango de TDS	Precisión	Tensión de salida
3,3 - 5,5 V DC	3 – 6 mA	0 - 1000ppm	± 10% F.S. (a 25 °C)	0 - 2.3V

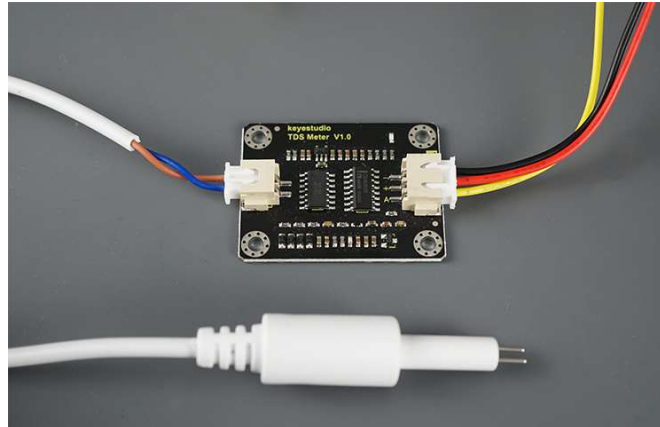


Figura 8 - Sensor KS0429 Keyestudio TDS Meter V1.0.

Al igual que ocurre con el sensor de pH, esta es una propuesta de selección de sensor, ya que, al momento de la redacción de este documento, no se ha adquirido aún.

### 7.2.1.3 - Caudalímetros

Los caudalímetros se encargan de medir la cantidad de las distintas soluciones que se agregan al recipiente principal, como los reguladores de pH y los nutrientes.

El caudalímetro YF-S401 está diseñado para medir con precisión la velocidad del flujo de líquido en una amplia gama de aplicaciones, desde sistemas de riego hasta dispositivos de dosificación de líquidos en entornos industriales. Su funcionamiento se fundamenta en la interacción entre una turbina interna y un sensor de efecto Hall.

En su interior, este dispositivo alberga una pequeña turbina equipada con paletas que giran libremente cuando el líquido fluye a través del sensor. Este movimiento de rotación es crucial, ya que cada paleta contiene un imán. Adyacente a la turbina se encuentra el sensor de efecto Hall, un dispositivo sensible a los campos magnéticos. Cuando las paletas pasan cerca del sensor, los imanes generan fluctuaciones en el campo magnético, detectadas por el sensor.

La interacción entre la turbina y el sensor de efecto Hall produce una serie de pulsos eléctricos proporcionales a la velocidad del flujo de líquido. Cuanto mayor sea la velocidad del flujo, mayor será la frecuencia de estos pulsos. Esta relación lineal entre la velocidad del flujo y la frecuencia de los pulsos permite al caudalímetro convertir de manera precisa la magnitud física del flujo en una señal eléctrica, la cual puede ser procesada por un microcontrolador o dispositivo electrónico.

En este caso, como lo que interesa para la aplicación no es el caudal, sino el volumen, se realizó una búsqueda en los documentos proporcionados por el fabricante y se encontró que cada pulso representa aproximadamente 2.25 mililitros. Teniendo esto en cuenta y, posterior a pruebas empíricas, se obtuvieron ecuaciones que transforman la cantidad de pulsos en mililitros que atraviesan el caudalímetro.

Tabla 5 - Características adicionales del caudalímetro YF-S401.

Tensión de alimentación	Corriente	Caudal de trabajo	Precisión	Temperatura de funcionamiento
5 – 18 V DC	10mA (a 5V)	0,3 – 6 l/m	1,75MPa	-25 – 80 °C



Figura 9 - Caudalímetro YF-S401.

#### 7.2.1.4 - Nivel de iluminación

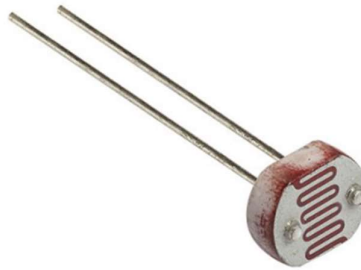
El sensor de resistencia dependiente de la luz (LDR, por sus siglas en inglés) es un dispositivo electrónico que aprovecha las variaciones en la resistencia eléctrica en función de la intensidad de la luz incidente.

El funcionamiento del LDR se basa en la propiedad de ciertos materiales semiconductores de cambiar su resistencia eléctrica cuando son expuestos a la luz. En el caso específico del

LDR, este dispositivo está compuesto por un material semiconductor especial que exhibe una resistencia eléctrica alta en condiciones de baja intensidad lumínica y una resistencia baja cuando está expuesto a una luz intensa.

Cuando la luz incide sobre el LDR, los fotones interactúan con el material semiconductor, liberando electrones y generando pares electrón-hueco. Esta acción provoca un aumento en la conductividad eléctrica del material y, por lo tanto, una disminución en la resistencia eléctrica total del dispositivo. La magnitud de este cambio en la resistencia está directamente relacionada con la intensidad de la luz incidente: a mayor intensidad lumínica, menor será la resistencia del LDR.

La variación en la resistencia se puede medir utilizando un circuito adecuado que incluya una fuente de alimentación y un elemento de lectura, como un microcontrolador o un multímetro. Al conectar el LDR en un circuito eléctrico apropiado, la resistencia del dispositivo puede ser monitoreada continuamente. Cuando la luz incide sobre el LDR, la resistencia disminuye, lo que se refleja en un cambio en la tensión o corriente medida por el circuito.



*Figura 10 – LDR.*

#### 7.2.1.5 - Temperatura y humedad ambiente

El módulo DHT22 es un sensor de temperatura y humedad que integra el sensor DHT22 y los componentes necesarios para su operación en una sola unidad compacta. Su principio de funcionamiento se basa en la detección de cambios en la resistencia eléctrica de un polímero especial cuando es expuesto a la temperatura y la humedad ambiente.

El sensor DHT22 dentro del módulo está compuesto por un elemento sensible a la temperatura y un elemento sensible a la humedad, ambos ubicados en un encapsulado protector. Cuando se aplica una corriente eléctrica al sensor, los elementos sensores reaccionan de manera específica a la temperatura y la humedad ambiental.



El elemento sensible a la temperatura es un termistor, cuya resistencia eléctrica varía de manera predecible en función de la temperatura. Cuando la temperatura ambiente cambia, la resistencia del termistor también cambia, lo que provoca una variación en la corriente eléctrica medida por el circuito.

Por otro lado, el elemento sensible a la humedad utiliza un polímero especial que absorbe o libera agua en respuesta a cambios en la humedad relativa del aire. Esta acción modifica la conductividad eléctrica del polímero, lo que a su vez afecta la corriente eléctrica medida por el circuito.

El módulo DHT22 incluye un circuito de acondicionamiento de señal y un microcontrolador interno que se encarga de procesar las variaciones en la corriente eléctrica medida por los elementos sensores. Este microcontrolador convierte estas variaciones en lecturas digitales de temperatura y humedad, que pueden ser transmitidas a un microcontrolador externo, como un Arduino, a través de un único pin de datos.

Tabla 6 - Características adicionales del módulo DHT22.

Tensión de alimentación	Corriente	Rango de temperatura	Precisión temperatura	Rango de humedad	Precisión humedad
3,3 – 6 V DC	2,5mA	-40 – 125 °C	0.5°C	0 - 100%	0,1%

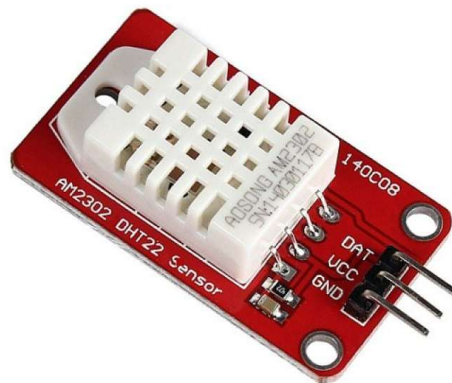


Figura 11 - Módulo DHT22.

#### 7.2.1.6 - Temperatura de la solución

El DS18B20 es un sensor de temperatura digital de alta precisión que utiliza el protocolo de comunicación OneWire para transmitir datos. Este sensor, ampliamente utilizado en aplicaciones donde se requiere una medición precisa de la temperatura, como sistemas de

control climático, dispositivos médicos y aplicaciones industriales, opera mediante la detección de cambios en la resistencia eléctrica de un termistor semiconductor en respuesta a la temperatura ambiente.

El principio de funcionamiento del DS18B20 se basa en la relación entre la resistencia eléctrica y la temperatura de un termistor semiconductor. Este termistor está diseñado para tener una resistencia que varía de manera predecible con cambios en la temperatura ambiente. Cuando la temperatura aumenta, la resistencia del termistor disminuye, y viceversa.

El DS18B20 incluye un termistor encapsulado dentro de un paquete resistente al agua y protegido contra interferencias eléctricas. Además del termistor, el sensor también incorpora un convertidor analógico a digital (ADC) y un microcontrolador interno que se encarga de procesar y transmitir los datos de temperatura.

Cuando se aplica una corriente eléctrica al sensor, el termistor responde a la temperatura ambiente modificando su resistencia eléctrica. Esta variación en la resistencia se convierte en una señal analógica por el ADC interno. El microcontrolador del DS18B20 digitaliza esta señal analógica y la convierte en una lectura digital de temperatura.

El DS18B20 utiliza el protocolo de comunicación OneWire para transmitir esta lectura digital al microcontrolador externo, como un Arduino o un microprocesador. Este protocolo permite la comunicación bidireccional de datos a través de un único cable de datos, simplificando la interfaz entre el sensor y el microcontrolador.

*Tabla 7 - Características adicionales del sensor DS18B20.*

Tensión de alimentación	Rango de temperatura	Error (-10°C a 85°C)	Error (-55°C a 125°C)	Resolución
3 - 5,5 V DC	-55 – 125 °C	±0,5°C	±2°C	12 bit



Figura 12 – Sensor de temperatura DS18B20.

## 7.2.2 - Actuadores

En este proyecto se han seleccionado diversos actuadores para llevar a cabo las acciones necesarias que complementan las mediciones de los sensores y aseguran el funcionamiento óptimo del sistema hidropónico. Estos actuadores son cruciales para la automatización y el control preciso de las condiciones ambientales y de los recursos en el sistema.

A continuación, se describen los actuadores elegidos, especificando las variables sobre las que actúan y sus características técnicas relevantes.

### 7.2.2.1 - Bomba principal

La bomba RS-932 es la encargada de movilizar la solución nutritiva hacia las plantas, tomando el fluido desde el tanque principal y elevándolo hacia el estante superior, donde es introducido a los tubos donde se encuentran sumergidas las raíces de las plantas. La solución, al ingresar al primer tubo, recorre los demás por rebalse y efecto de la gravedad, concluyendo su recorrido al retornar al tanque principal.

La acción de este actuador estará comandada por períodos de tiempo de encendido y apagado, que son configurados en el código.

Tabla 8 - Características adicionales de la bomba RS-932.

Tensión de alimentación	Corriente	Potencia	Capacidad	Altura máxima
220 V AC	0.082A	18W	820 l/hora	1,8 m



Figura 13 - Bomba principal.

### 7.2.2.2 - Bombas secundarias

Encargadas de movilizar las distintas soluciones almacenadas en los tanques secundarios hacia el principal. Dichos tanques contienen los nutrientes y los reguladores de pH que permiten acondicionar la solución que luego llegará hacia las raíces de las plantas.

La acción de las bombas secundarias rige de forma conjunta con los caudalímetros ya descritos.

En este caso, mediante el código, se calcula la cantidad en mililitros de las soluciones secundarias y se encienden las bombas hasta que se haya detectado que ese volumen fluyó a través de los caudalímetros.

Tabla 9 - Características adicionales de la bomba secundaria.

Tensión de alimentación	Corriente	Potencia	Capacidad	Altura máxima
3 - 5 V DC	0.3A	1.5W	120 l/hora	0,4 m



Figura 14 - Bomba secundaria.

### 7.2.2.3 - LEDs

Los LEDs del sistema hidropónico autocontenido cumplen una función fundamental en el crecimiento de las plantas. Emiten luz en una longitud de onda violeta del espectro visible, esencial para la fotosíntesis de las plantas. Esta luz estimula el crecimiento vegetativo, la formación de clorofila y otros pigmentos necesarios para un desarrollo saludable.

En un entorno indoor, donde las plantas no están expuestas directamente al sol, estos LEDs proporcionan la luz necesaria para sustituir ese papel crucial que cumple la luz solar en el crecimiento de las plantas en exterior.

Al igual que en el caso de la bomba principal, los LEDs funcionarán con períodos de tiempo de encendido y apagado, configurados en el código almacenado en la placa Arduino.

Tabla 10 - Características adicionales de los LEDs.

Tensión de alimentación	Corriente	Potencia	Longitud de onda	Flujo luminoso
220 V AC	0.23A	50W	380 - 840 nm	5000 lm

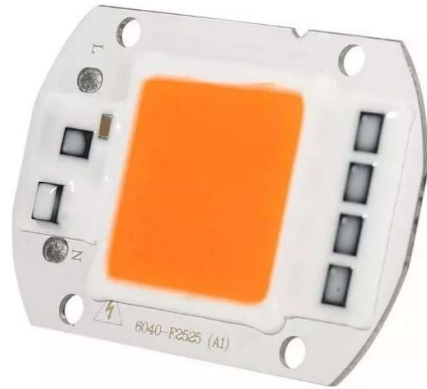


Figura 15 – LED longitud de onda violeta.

#### 7.2.2.4 - Ventiladores

Son los encargados de la refrigeración del sistema, asegurando mantener la temperatura óptima para el desarrollo de las plantas.

Seis de ellos se encuentran en la pared posterior del gabinete, dirigidos de manera tal que extraigan el aire de este, permitiendo que, por presión negativa, ingrese aire a menor temperatura desde el exterior por las ventilaciones ubicadas en las puertas. El funcionamiento de estos se rige por una función de control que trabaja con los datos obtenidos con los sensores de temperatura.

Además, se encuentran dos adicionales ubicados en un tubo de ventilación para los LEDs del segundo estante. En este tubo se alojan los disipadores de la iluminación y dos de los ventiladores se encargan de refrigerarlos. Uno ingresa un flujo de aire a través de una perforación en la pared izquierda y el otro se encarga de extraerlo de la misma manera por la pared derecha. Estos ventiladores se encuentran encendidos de manera conjunta con los LEDs.

El funcionamiento de los que se encargan de regular la temperatura del gabinete se rige por una función de control que trabaja en conjunto con los datos de los sensores de temperatura.

La tensión de alimentación de este actuador es 12V DC.



Figura 16 - Ventilador 12V.

## 8 - Diseño e implementación del sistema de control automatizado

### 8.1 - Implementación del software

Tanto la automatización como la recolección de datos se basan en un único código programado mediante el IDE de Arduino, el cual se encuentra almacenado en la memoria interna de la placa.

En primer lugar, dentro de su estructura encontramos la definición de todos los pines utilizados, asignándoles un identificador que permita reconocerlos dentro del código de manera más sencilla que simplemente por un número.

Luego se procede a realizar configuraciones de sensores e inicializar todas las variables que se utilizarán, como las de tiempo, estado, cantidad, valores límites, entre otras.

Posteriormente, mediante funciones en la sección "setup", se configuran cada uno de los componentes, principalmente definiendo los pines que utilizan como entradas o salidas según corresponda e iniciando los actuadores como encendidos o apagados. Además, se define la velocidad de transmisión de datos por el puerto serie.

Por último, en la sección "loop", se ejecutan de manera consecutiva, continua e ininterrumpida, todas las funciones que se encargan de obtener los datos de las variables de interés del sistema y llevar a cabo el control y la automatización.

Los datos obtenidos son solamente enviados por el puerto serie cuando se recibe una señal exterior que los requiere.

En la siguiente figura se muestra un diagrama de flujo que representa el proceso explicado.

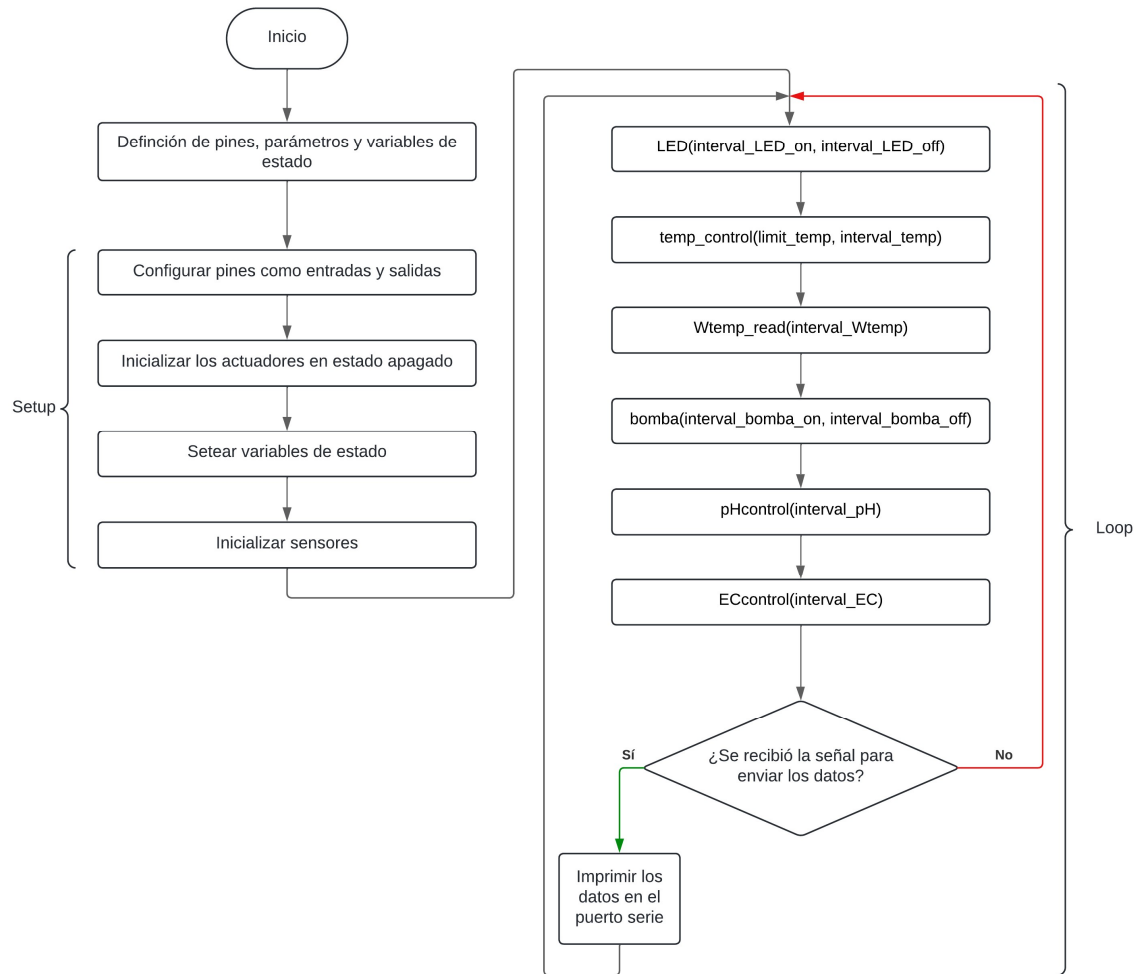


Figura 17 - Diagrama de flujo del código.

Todas las funciones que impliquen control, no solo se encargan de sensar luego del paso de un tiempo previamente establecido, sino que, además, dentro de ellas, ejecutan funciones que se encargan de encender los actuadores necesarios para la regulación de los diferentes parámetros. A continuación, se presentan las estructuras y los diagramas de flujo de algunas de ellas.

### 8.1.1 - Estructura de funciones de control

La función encargada del control del pH es “pHControl”, la cual se divide en dos grandes secciones, la de medición y la de actuación.

En la etapa de medición se obtiene el valor del sensor pH y se evalúa, comparándolo con los valores máximos y mínimos y definiendo si se encuentra por encima o por debajo de los



límites establecidos. Esto a su vez modifica un contador, en el cual, si el valor de pH es alto, se incrementa en una unidad, si es bajo se decrementa y si está dentro de los límites, se establece en cero.

En la etapa de actuación se evalúa este contador. Para este ejemplo se eligió, como valor límite del contador, tres. Al superar las tres mediciones de pH por fuera del rango permitido, se actúa, según corresponda, sobre las bombas que agregan una solución acida o alcalina para regularlo.

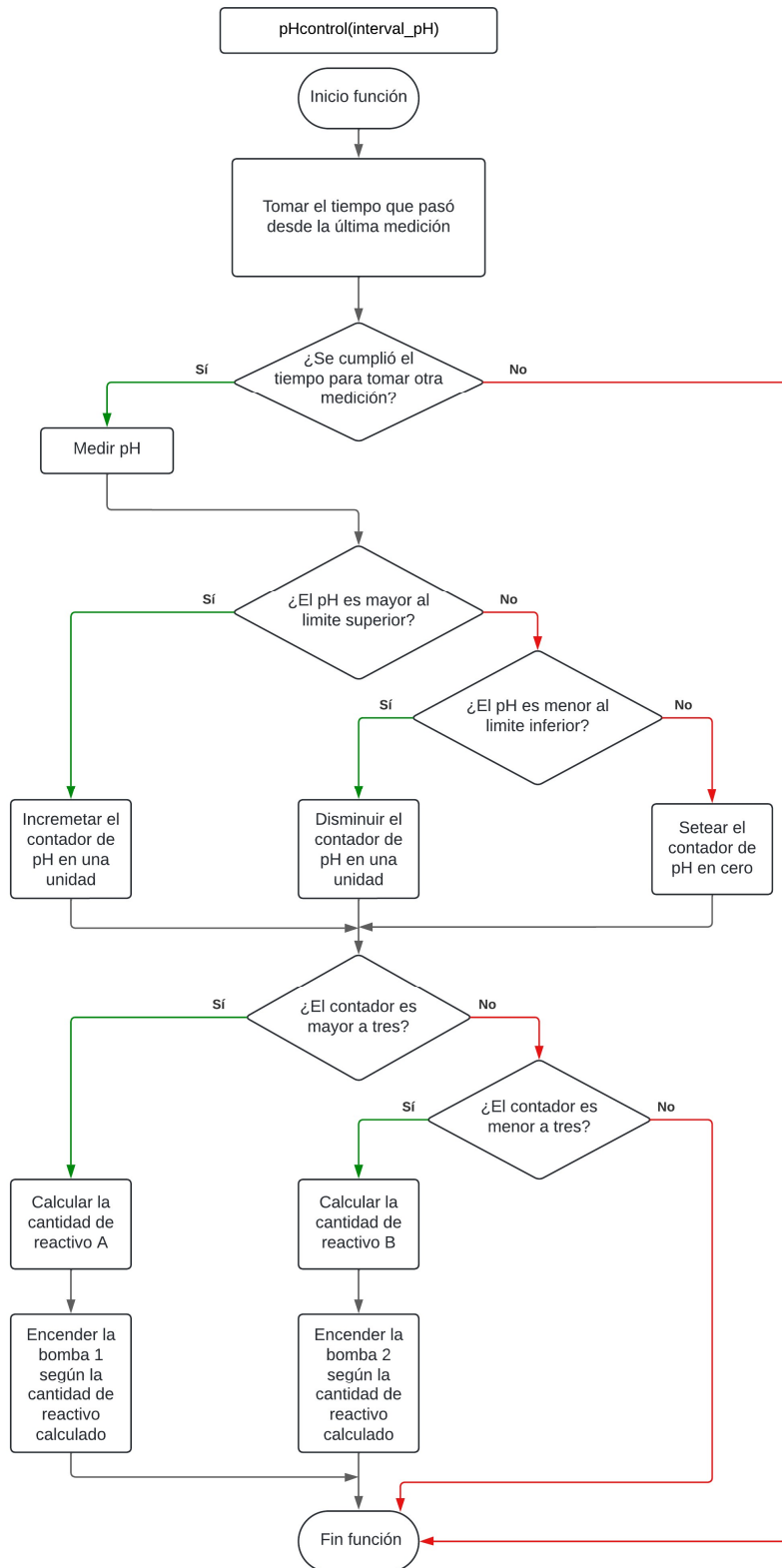


Figura 18 - Diagrama de flujo de la función de control de pH.

### 8.1.2 - Control de temperatura PID

El desarrollo de las plantas está influenciado por una amplia gama de factores ambientales y biológicos que interactúan de manera compleja. La luz, la disponibilidad de agua y nutrientes, y las interacciones bióticas son solo algunos de los elementos que desempeñan un papel crucial en el crecimiento de las plantas. Cada uno de estos factores puede tener un impacto significativo en la fisiología de las plantas, y su combinación determina en gran medida la salud y productividad de estas. Por ejemplo, una deficiencia en nutrientes puede limitar la capacidad de una planta para realizar la fotosíntesis de manera eficiente, mientras que la exposición inadecuada a la luz puede inhibir el crecimiento de biomasa y la producción de compuestos esenciales (Srivastava et al., 2023).

Entre estos factores, la temperatura se destaca como un elemento clave que puede influir tanto positiva como negativamente en el desarrollo de las plantas medicinales. Temperaturas fuera del rango óptimo de una planta pueden causar estrés térmico, lo cual se manifiesta en una serie de respuestas fisiológicas adversas. Estas incluyen una disminución en la tasa de fotosíntesis, alteraciones en la transpiración, y cambios en la actividad enzimática, todo lo cual puede llevar a una reducción en el crecimiento y en la calidad de los metabolitos secundarios producidos por la planta. Este es un aspecto crítico, dado que estos metabolitos son responsables de las propiedades terapéuticas de muchas plantas medicinales (Castroverde & Dina, 2021).

El impacto de la temperatura en las plantas medicinales no solo se limita a su crecimiento, sino que también afecta la síntesis de compuestos bioactivos esenciales. Las plantas sometidas a estrés térmico, ya sea por frío o calor, pueden experimentar un estrés oxidativo que compromete su capacidad para sintetizar metabolitos secundarios como alcaloides, flavonoides y aceites esenciales. Esto es particularmente relevante en plantas medicinales, donde la calidad y concentración de estos compuestos son fundamentales para su efectividad terapéutica. La investigación ha demostrado que condiciones de temperatura inadecuadas pueden reducir la capacidad de las plantas para producir estos metabolitos, comprometiendo su valor medicinal (Srivastava et al., 2023) (Castroverde & Dina, 2021).

Para mantener la temperatura dentro de los rangos configurados se eligió trabajar con un control Proporcional-Integral-Derivativo (PID).

El Control PID es una técnica de control ampliamente utilizada en la ingeniería y la automatización industrial debido a su versatilidad y capacidad para adaptarse a una amplia gama de sistemas dinámicos. En su esencia, el PID proporciona un método sistemático para mantener una variable de proceso (como temperatura, velocidad, posición, entre otras) lo

más cerca posible de un valor deseado, conocido como setpoint, a pesar de las perturbaciones y cambios en las condiciones del sistema.

El control PID se compone de tres términos principales que actúan en conjunto para ajustar la salida del sistema:

1. Control Proporcional (P): El término proporcional ajusta la salida proporcionalmente al error actual entre la variable medida y el setpoint. Esta acción es rápida y proporciona una respuesta inmediata a las perturbaciones. Sin embargo, puede resultar en un error de estado estacionario si se utiliza solo.
2. Control Integral (I): El término integral integra el error acumulado a lo largo del tiempo y ajusta la salida en función de esta integral. Esto asegura que los errores de estado estacionario, que son errores constantes a largo plazo, sean corregidos gradualmente.
3. Control Derivativo (D): El término derivativo predice la tasa de cambio del error y ajusta la salida para contrarrestar las fluctuaciones rápidas en la variable medida. Esto mejora la estabilidad del sistema al prever y ajustar la respuesta antes de que ocurran cambios significativos.

Este tipo de control, para regular la temperatura del sistema, se eligió teniendo en cuenta:

- Simplicidad de Implementación: A pesar de su potencia, el PID es relativamente simple de implementar en comparación con otros métodos de control más complejos. Su estructura modular (proporcional, integral y derivativa) permite ajustar y optimizar el comportamiento del sistema con parámetros bien definidos.
- Ajuste y Sintonización: Los parámetros del PID se pueden ajustar y sintonizar según las características específicas del sistema y las demandas de rendimiento. Métodos estándar como el método de Ziegler-Nichols proporcionan procedimientos sistemáticos para determinar estos valores de manera efectiva.
- Respuesta Dinámica: El PID proporciona una respuesta dinámica que equilibra la velocidad de respuesta con la estabilidad del sistema. La acción proporcional responde inmediatamente al error presente, la acción integral aborda los errores de estado estacionario a largo plazo y la acción derivativa anticipa y corrige la tendencia del error futuro.

En el sistema sobre el cual se trabaja, la iluminación mediante LEDs actúa como una fuente de calor, donde parte de la energía eléctrica utilizada por estos se transforma en calor debido a la ineficiencia en la conversión de energía eléctrica a luz. Aunque el encendido de los LEDs

es independiente de la temperatura, el calor generado por estos es un factor que debe ser considerado para mantener las condiciones óptimas en el ambiente de cultivo de plantas medicinales.

Teniendo esto en cuenta, se realizó una toma de datos para analizar la respuesta de este parámetro en función del tiempo. Los resultados de las mediciones realizadas cada 30 segundos en un lapso de 2 horas permitieron trazar la curva que se presenta a continuación:

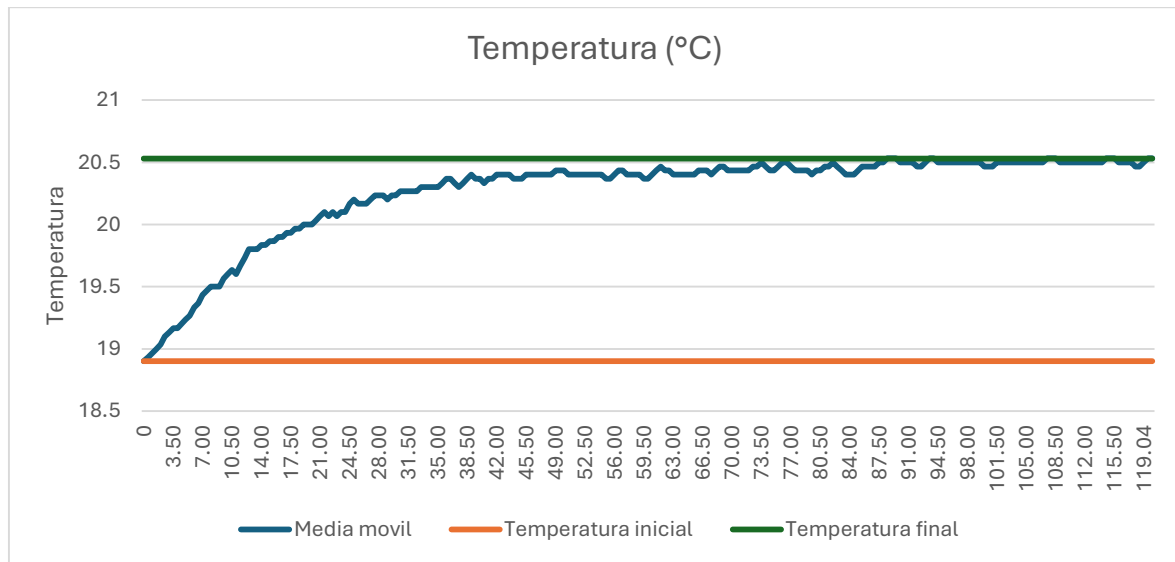


Figura 19 - Evolución de la temperatura en un período de dos horas.

Para la obtención de los parámetros necesarios en el control PID se utilizó el primer método de Ziegler-Nichols (Ogata, 2010). Fue desarrollado en 1942 y sigue siendo popular debido a su simplicidad y efectividad. Este método es particularmente útil para sistemas con retardo y proporciona reglas empíricas para calcular los parámetros del controlador PID basándose en la respuesta del sistema a un escalón. En el caso de estudio, la acción de encender las luces LED se decidió representar como un escalón.

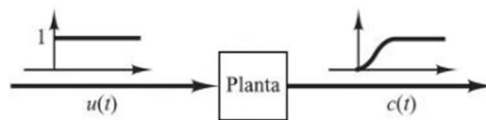


Figura 20 - Respuesta a un escalón unitario de una planta (Ogata, 2010).

En la siguiente figura, la curva azul que muestra la evolución de la temperatura a lo largo del tiempo fue aproximada por la curva amarilla para facilitar el análisis. Esta curva tiene una forma de S, caracterizada por dos parámetros clave: el tiempo de retardo (L) y la constante de tiempo (T).

Para determinar estos parámetros de manera gráfica, se dibuja una línea tangente (roja) en el punto de inflexión de la curva en S, y se identifican las intersecciones (rosa) de esta tangente con las líneas que representan los valores iniciales (naranja) y finales (verde).

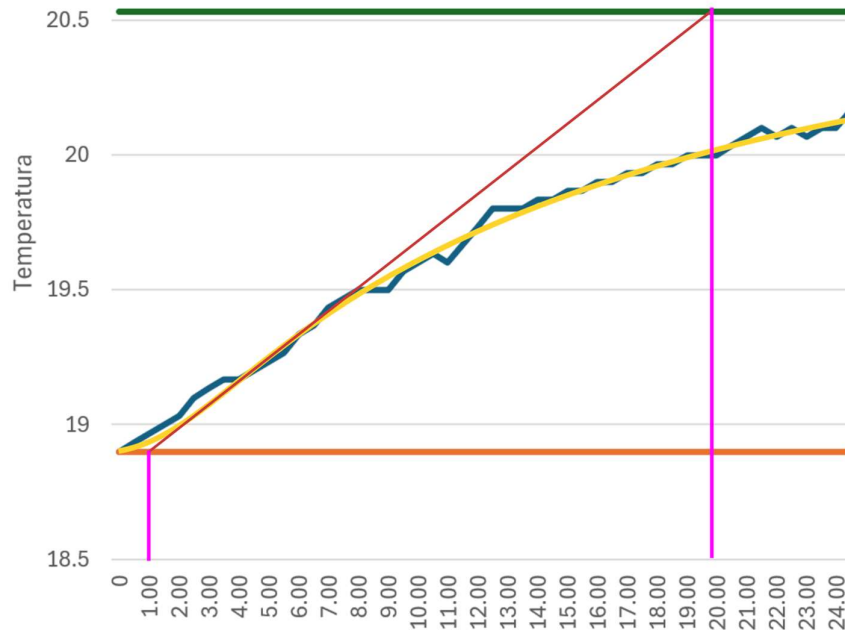


Figura 21 - Aproximación de la curva y obtención de parámetros.

Mediante el método gráfico presentado se obtuvieron los parámetros:

- Retraso ( $L$ ): El retraso o tiempo muerto es el tiempo que tarda la respuesta del sistema en empezar a cambiar después de que se aplique un escalón en la entrada.

$$L = 60s$$

- Constante de Tiempo ( $T$ ): la constante de tiempo obtenida gráficamente es igual a 20 minutos, equivalente en segundos a:

$$T = 1200s$$

Teniendo en cuenta que la temperatura en este caso no comienza desde cero, se debe tener en cuenta un factor más para el cálculo final.

- Ganancia del Sistema ( $K$ ): La ganancia se calcula como la relación entre el cambio en la salida final y el cambio en la entrada (escalón). Teniendo en cuenta que la temperatura inicial del sistema fue 18.9°C y la final 20.6°C, se calcula:

$$K = \frac{\Delta T}{\Delta u}$$

$$K = \frac{T_f - T_i}{\Delta u}$$

$$K = \frac{20.6^\circ\text{C} - 18.9^\circ\text{C}}{1}$$

$$K = 1.7^\circ\text{C}$$

Con estos valores ya obtenidos se procedió a calcular los parámetros PID, utilizando las fórmulas de Ziegler-Nichols. Dichos parámetros son utilizados posteriormente por el código Arduino para realizar el control.

- Proporcional:

$$K_p = \frac{1.2 \times T}{L \times K} = \frac{1.2 \times 1200}{60 \times 1.7}$$

$$K_p = 14.12$$

- Integral:

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i}$$

$$K_i = \frac{K_p}{2 \times L}$$

$$K_i = \frac{14.12}{2 \times 60}$$

$$K_i = 0.12$$

- Derivativo:

$$K_d = K_p \times \tau_d$$

$$K_d = K_p \times \left(\frac{1}{2} \times L\right)$$

$$K_d = 14.12 \times \left(\frac{1}{2} \times 60\right)$$

$$K_d = 423.6$$

En el control PID se utiliza una ecuación que incluye términos proporcionales, integrales y derivativos que se nutren de los parámetros anteriormente calculados para obtener la salida del controlador. La ecuación continua del controlador PID es:

$$c_{(t)} = K_p \times e_{(t)} + K_i \times \int_0^t e_{(t)} dt + K_d \times \frac{de_{(t)}}{dt}$$

Donde:

- $c_{(t)}$  es la salida del controlador.
- $e_{(t)}$  es el error en el tiempo t (la diferencia entre el valor deseado y el valor medido).

Para implementar este controlador en un sistema digital, es necesario discretizar la ecuación, dado que las computadoras y microcontroladores trabajan con señales discretas en el tiempo. Esto se hace sustituyendo las derivadas e integrales por sus aproximaciones discretas.

El término integral acumula el error a lo largo del tiempo, y en su versión discreta se representa como una suma acumulativa de errores:

$$Integral_{(t)} = Integral_{(t-\Delta t)} + e_{(t)} \times \Delta t$$

Donde:

- $\Delta t$  es el intervalo de tiempo entre cada actualización

En el caso término derivativo, este mide la tasa de cambio del error. En su forma discreta, se aproxima usando la diferencia finita entre el error actual y el error anterior:

$$Derivada_{(t)} = \frac{e_{(t)} - e_{(t-\Delta t)}}{\Delta t}$$

Teniendo estas adecuaciones en cuenta, se presentó el siguiente código para realizar las operaciones a través del Arduino.



```
unsigned long now = millis(); //Obtener la marca de tiempo actual
double timeChange = (double)(now - lastTime)/1000;
double error_anterior = error_actual;
input = temp_value_int;
error_actual = setPoint - input;

// Calculo del término integral
integral += error_actual * timeChange;
ITerm = Ki * integral;

// Calculo del término derivativo
double dInput = (error_actual - error_anterior) / timeChange;

// Calculo del PID
output = Kp * error_actual + ITerm + Kd * dInput;

// Control On/Off basado en el output del PID
if (output < 0) {
  vent(1); //Enciende los ventiladores
} else {
  vent(0); //Apaga los ventiladores
}

// Guarda variables para el siguiente ciclo
lastInput = input;
lastTime = now;
```

Figura 22 - Código Arduino para el control PID.

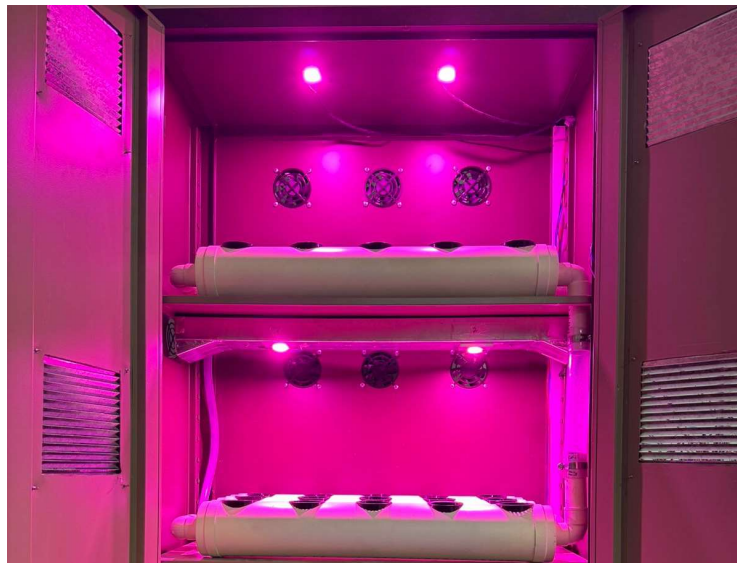
La salida del controlador  $c_{(t)}$  se usa para actuar sobre un sistema con el fin de minimizar el error. Idealmente, la salida debería aplicarse a un actuador analógico que pueda responder de manera continua al valor de  $c_{(t)}$ . Sin embargo, en este caso particular, se dispone de ventiladores que únicamente pueden encenderse o apagarse, sin capacidad para variar su velocidad de manera continua. Además, se descartó el uso de un control PWM (Modulación por Ancho de Pulso) para simular una respuesta analógica ya que los ventiladores son encendidos a través de relés mecánicos, para los cuales implicaría un gran desgaste.

Esto significa que, aunque el control PID genera una salida continua, en la práctica se toma una decisión digital: si la salida supera un umbral, se encienden los ventiladores; de lo contrario, se mantienen apagados.

En ambientes más hostiles, con temperaturas más extremas o cambiantes, podría justificarse el uso de un control analógico para tener una regulación más precisa. Pero, dado que en la ubicación donde se encuentra el sistema, la temperatura se encuentra dentro de valores razonables para el cultivo de plantas, y el encendido de las luces por largos períodos solo aumenta la temperatura en 2 grados Celsius, un control analógico resulta innecesario.

### 8.1.3 - Verificación de encendido de luces

Dentro de los componentes del sistema se menciona el sensor LDR (resistencia dependiente de la luz), el cual varía su resistencia en función de la intensidad de luz que recibe. En la etapa en la que se encuentra el proyecto cumple la función de verificar que una vez que se indica a las luces encenderse, estas efectivamente lo hagan, teniendo en cuenta lo importante que es para el desarrollo de las plantas.



*Figura 23 - Demostración de luces LED.*

Para esto se evaluó los valores obtenidos por el sensor al exponerlo a tres situaciones: iluminación total y parcial, y oscuridad. Se debe tener en cuenta que en este caso el sensor no fue calibrado y solo se evalúa su respuesta eléctrica mediante un pin analógico de la placa Arduino, mapeando los resultados a valores comprendidos entre 0 y 1023.

Los valores fueron tomados cada un segundo y permitieron componer la gráfica que se muestra a continuación.

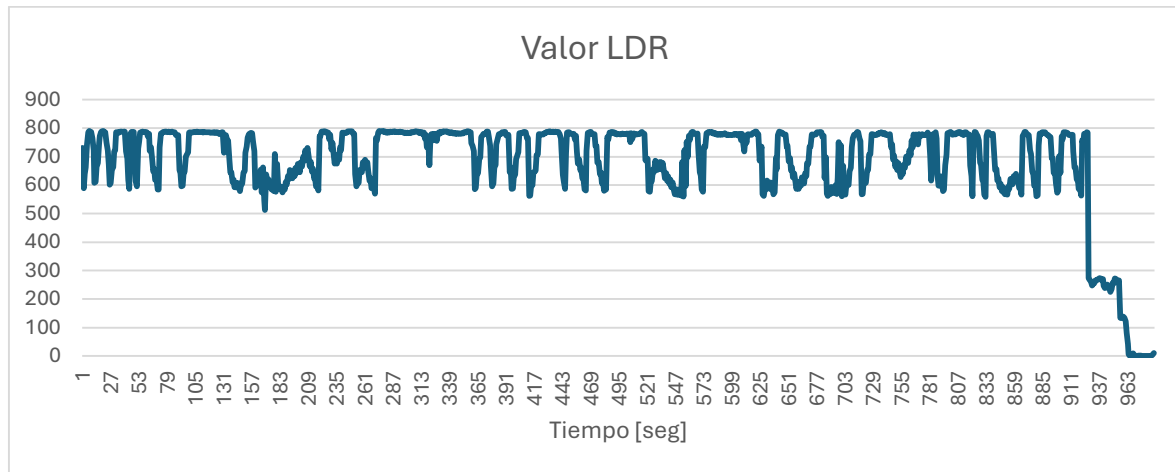


Figura 24 - Valores obtenidos por el LDR frente a distintos estímulos.

Al someter al sensor a estas condiciones se encontraron los siguientes resultados:

- Iluminación total: las luces de ambos estantes se encuentran encendidas. El LDR responde con valores comprendidos entre 450 y 800.
- Iluminación parcial: las luces de uno de los estantes se encuentran encendidas, mientras que las del otro se encuentran apagadas. Evaluados los dos posibles escenarios que cumplen esta condición, los valores obtenidos del LDR se sitúan entre 100 y 300, dependiendo del estante que se encuentre encendido.
- Oscuridad: las luces de ambos estantes se encuentran apagadas. En este último caso, el LDR responde con valores notablemente inferiores a 100, ubicándose, luego de unos segundos de estabilización, todos ellos por debajo de 10.

Con los valores obtenidos experimentalmente se procedió a configurar la etapa de control en el código que ejecuta el Arduino.

Además, la instalación del sensor permite que a futuro se puedan usar los valores sensados por el mismo para otros propósitos, como tener un valor certero del nivel de irradiancia que reciben las plantas, luego de calibrar el sensor y adecuar y filtrar la señal.

## 9 - Integración de datos y servidor local

Todos los datos obtenidos del sistema físico son procesados por el Arduino, el cual no solo se encarga del control, sino que recolecta los datos, les da un formato específico y los envía hacia una placa Raspberry Pi donde se aloja un servidor, del cual se encuentran encargados

de su desarrollo estudiantes de Ingeniería en Sistemas de Información. Éste se encargará, entre otras cosas, de darle vida al gemelo digital.

La figura N°25 esquematiza la relación entre los diferentes componentes nombrados anteriormente.

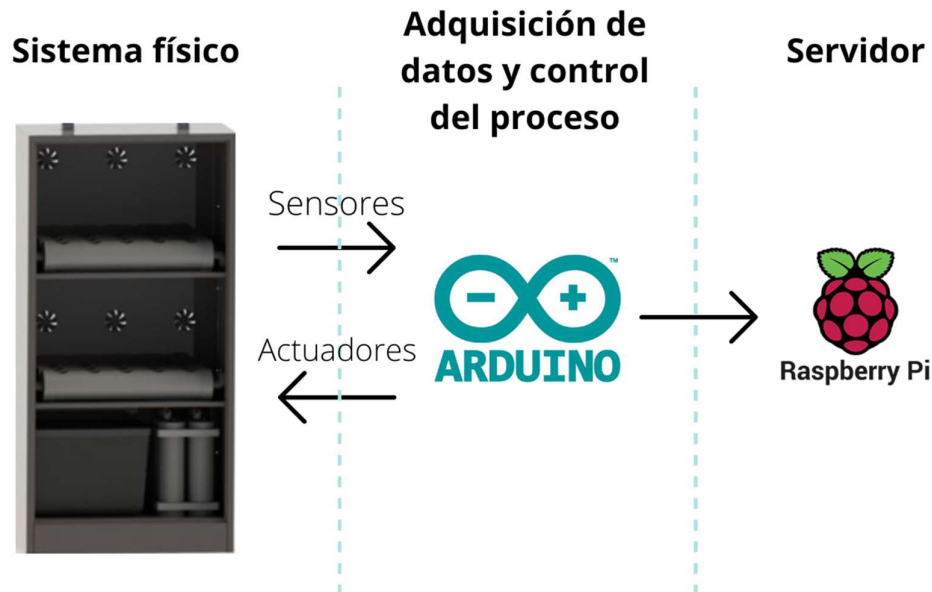


Figura 25 - Relación entre los componentes del sistema.

## 9.1 - Infraestructura de datos

En el contexto de la comunicación entre el Arduino y la Raspberry Pi, el formato JSON resulta una excelente opción para estructurar y transmitir datos de manera eficiente.

JSON (JavaScript Object Notation) es un formato de texto ligero para el intercambio de datos. Es fácil de leer y escribir para los humanos y fácil de analizar y generar para las máquinas, lo que lo convierte en un estándar popular para la transmisión de datos entre aplicaciones debido a su simplicidad y flexibilidad.

Este formato se basa en pares de clave-valor, donde cada clave está asociada con un valor específico. Las claves son cadenas de texto (strings) y deben estar entre comillas dobles. Por ejemplo, el valor de pH medido podría ser representado de la como:

“pH\_value”:8,

De esta manera, los datos tomados del sistema son fácilmente estructurados e identificables.

JSON se destaca por su simplicidad y claridad en la representación de datos. Esta simplicidad se traduce en estructuras directas y sencillas de entender, lo que facilita su implementación en una variedad de aplicaciones y sistemas. La flexibilidad es otra de sus cualidades sobresalientes, ya que puede representar una amplia gama de tipos de datos como objetos, arrays, cadenas de texto, números, booleanos y null. Además, JSON es compatible con la mayoría de los lenguajes de programación modernos, lo que lo convierte en un estándar de facto para la comunicación entre dispositivos heterogéneos como Arduino y Raspberry Pi.

## 9.2 - Protocolo de comunicación

El protocolo elegido para la comunicación entre el Arduino y la placa Raspberry Pi fue el Serie.

El protocolo Serie es un método de transmisión de datos en el que los bits de datos se envían secuencialmente uno tras otro a lo largo de un único canal de comunicación. Es ampliamente utilizado en la comunicación entre dispositivos debido a su simplicidad y eficiencia.

Algunas de sus principales características son:

- Transmisión Secuencial: Los datos se envían bit a bit en secuencia, lo que permite la comunicación con solo unos pocos cables.
- Sincronización: Puede ser sincrónica o asincrónica.
  - Sincrónica: Los datos se envían junto con una señal de reloj que sincroniza al transmisor y al receptor.
  - Asincrónica: Los datos se envían sin una señal de reloj, utilizando bits de inicio y parada para sincronizar los datos.
- Simplicidad: Requiere menos líneas de comunicación en comparación con la transmisión paralela, lo que reduce el costo y la complejidad.
- Velocidades Variables: Las velocidades de transmisión pueden variar dependiendo del hardware y la aplicación, desde unos pocos bits por segundo (bps) hasta varios megabits por segundo (Mbps) y, en muchos casos, configurable.

## 9.3 - Implementación en Arduino

Arduino utiliza ampliamente la comunicación en serie para interactuar con computadores y otros dispositivos. La biblioteca `serial` de Arduino facilita esta comunicación de manera sencilla y eficiente.

En primer lugar, en el Arduino, los datos que necesitan ser enviados (como lecturas de sensores, estados, entre otros) se organizan en un formato de texto definido, como lo es JSON. La biblioteca `ArduinoJson` facilita la creación de estos objetos JSON, permitiéndote estructurar la información en un formato legible y organizado.

Una vez que los datos están estructurados, se envían a través del puerto serie del Arduino. La Raspberry Pi, que está escuchando en ese puerto, recibe estos datos y puede procesarlos. Al usar JSON, la placa receptora puede fácilmente descomponer el mensaje y acceder a cada parte de la información, lo que facilita la comunicación y el análisis.

## 10 - Digitalización del sistema y creación de su "gemelo digital"

En la era actual de la transformación digital, la digitalización de sistemas físicos ha abierto nuevas fronteras en la industria.

La creación de gemelos digitales representa un avance significativo en esta evolución, ofreciendo representaciones virtuales precisas de objetos, sistemas o procesos físicos. Este concepto ha ganado terreno en diversos sectores industriales ya que, al integrar datos en tiempo real, la simulación, monitoreo y control de sistemas complejos, mejorando la toma de decisiones y optimizando procesos operativos.

### 10.1 - Concepto de gemelo digital

Los gemelos digitales son representaciones virtuales precisas de objetos, sistemas o procesos físicos que permiten una conexión bidireccional entre el mundo físico y el digital. Esta tecnología, que ha ganado una considerable atención tanto en el ambiente industrial como el académico, se basa en la integración de datos en tiempo real para replicar fielmente el comportamiento y estado de sus contrapartes físicas.

Un gemelo digital se puede definir como un modelo virtual de un sistema físico complejo, habilitado a través de datos y simuladores, para predicciones en tiempo real, optimización, monitoreo, control y toma de decisiones mejoradas (Rasheed et al., 2020). Este modelo digital no solo simula el comportamiento de su contraparte física, sino que también se adapta continuamente basado en datos reales recibidos mediante sensores y otras fuentes de información.

Entre sus ventajas más destacadas encontramos:

- **Mejora en la Toma de Decisiones:** Los gemelos digitales permiten un análisis detallado y en tiempo real de los sistemas físicos, lo que mejora significativamente la toma de

decisiones. Esto se debe a la capacidad de simular diferentes escenarios y predecir sus resultados antes de implementarlos físicamente (Mihai et al., 2022).

- **Optimización de Procesos:** En la industria manufacturera, los gemelos digitales ayudan a optimizar procesos de producción, mejorar la eficiencia operativa y reducir el tiempo de inactividad mediante el monitoreo y análisis continuos (Kober et al., 2022).
- **Mantenimiento Predictivo:** La capacidad de predecir fallos y realizar mantenimiento preventivo es una de las mayores ventajas de los gemelos digitales. Esto reduce los costos de mantenimiento y mejora la disponibilidad y confiabilidad de los sistemas (Fuller et al., 2019).
- **Eficiencia Energética:** Al permitir un monitoreo continuo y detallado de los sistemas, los gemelos digitales ayudan a identificar áreas de mejora en el uso de energía, contribuyendo a una mayor eficiencia energética y reducciones significativas en el consumo energético (Shahzad et al., 2022).
- **Reducción del Impacto Ambiental:** La optimización de procesos y la mejora de la eficiencia energética contribuyen a una menor huella de carbono y a la sostenibilidad ambiental. Además, los gemelos digitales facilitan el diseño de productos y sistemas más sostenibles y eficientes (Broo & Schooling, 2021).
- **Innovación y Desarrollo:** Los gemelos digitales permiten la experimentación y validación de nuevos productos y servicios en un entorno virtual, lo que acelera el ciclo de desarrollo y reduce los riesgos asociados con la innovación (Wright & Davidson, 2020).

Desde que el concepto de gemelos digitales fue introducido en 2003 en el curso de Product Lifecycle Management (PLM) en la Universidad de Michigan, la tecnología ha avanzado significativamente, permitiendo una representación virtual detallada y precisa de productos físicos, facilitando su diseño, producción y mantenimiento, aunque todavía encontramos desafíos que superar para la mejora continua de su implementación, por ejemplo:

- **Integración de Datos:** La integración efectiva de grandes volúmenes de datos provenientes de diversas fuentes es un desafío significativo. La falta de estandarización y la necesidad de una infraestructura robusta para el procesamiento de datos son obstáculos importantes (Arin et al., 2023).

- Seguridad y Privacidad: La implementación de gemelos digitales requiere una gestión cuidadosa de la seguridad y privacidad de los datos, ya que el intercambio constante de información entre el mundo físico y digital puede ser susceptible a vulnerabilidades (Adjei & Montasari, 2020).
- Falta de Estándares: La ausencia de estándares universales para el desarrollo y la implementación de gemelos digitales dificulta su adopción y limita la interoperabilidad entre diferentes sistemas y plataformas (Jones et al., 2020).
- Costo y Complejidad: La creación y mantenimiento de gemelos digitales pueden ser costosos y complejos, especialmente para pequeñas y medianas empresas que pueden no tener los recursos necesarios (Broo & Schooling, 2021).

### 10.1.1 - Industria 4.0 y gemelos digitales

La Industria 4.0, caracterizada por la integración de tecnologías avanzadas como IoT, inteligencia artificial y automatización, ha sido un catalizador crucial para el desarrollo y adopción de gemelos digitales. En este contexto, actúan como un enlace esencial entre el mundo físico y el digital, permitiendo una producción más flexible, eficiente y personalizada.

Además, la Industria 4.0 ha emergido como una solución integral que aborda varios de los desafíos mencionados en la implementación de gemelos digitales, utilizando tecnologías avanzadas para superar las barreras de datos, seguridad, estandarización y costos.

En primer lugar, impulsa el desarrollo de estándares globales, lo que facilita la interoperabilidad entre sistemas y plataformas. Esta estandarización no solo uniformiza la creación y utilización de gemelos digitales, sino que también asegura que los datos puedan ser compartidos y comprendidos a lo largo de la cadena de suministro global, superando así las limitaciones derivadas de la falta de normas universales.

En cuanto a la seguridad, la Industria 4.0 aborda de manera proactiva las preocupaciones relacionadas con la protección y privacidad de los datos. A través de la implementación de tecnologías avanzadas de ciberseguridad, como el cifrado de datos y la autenticación robusta, se protege la integridad de los gemelos digitales y la información que intercambian. Además, el monitoreo continuo de sistemas asegura que cualquier vulnerabilidad sea detectada y gestionada oportunamente.

Otro aspecto crucial es la optimización de la integración de datos. La Industria 4.0 facilita esta integración mediante la conectividad IoT y la analítica avanzada, permitiendo que los gemelos digitales se alimenten de datos en tiempo real provenientes de múltiples fuentes. Esto mejora



significativamente la precisión y la utilidad de las simulaciones y modelos virtuales, haciendo que la representación digital sea un reflejo más exacto del mundo físico.

La Industria 4.0 también facilita la adopción de gemelos digitales al simplificar su implementación y reducir los costos asociados. Las soluciones tecnológicas modernas, con su enfoque en la automatización y escalabilidad, permiten que incluso las pequeñas y medianas empresas puedan integrar gemelos digitales en sus operaciones sin requerir grandes inversiones iniciales. Además, el uso de plataformas en la nube y la posibilidad de compartir recursos tecnológicos hacen que esta tecnología sea más accesible, permitiendo que un mayor número de organizaciones aprovechen sus beneficios sin enfrentar barreras financieras significativas.

## 10.2 - Ubicación del proyecto dentro de la RAMI 4.0

Al comienzo de este documento se describió el modelo de referencia de arquitectura RAMI 4.0 (Reference Architecture Model Industrie 4.0), el cual proporciona un marco tridimensional para la integración y estructuración de tecnologías en la Industria 4.0. Este modelo facilita la comprensión de cómo los diferentes elementos de un sistema pueden ser organizados y gestionados dentro de una organización.

En este punto, teniendo el contexto de lo que trata RAMI 4.0 y conociendo el sistema sobre el cual se trabaja, es posible ubicar dicho sistema dentro del esquema que plantea la norma.

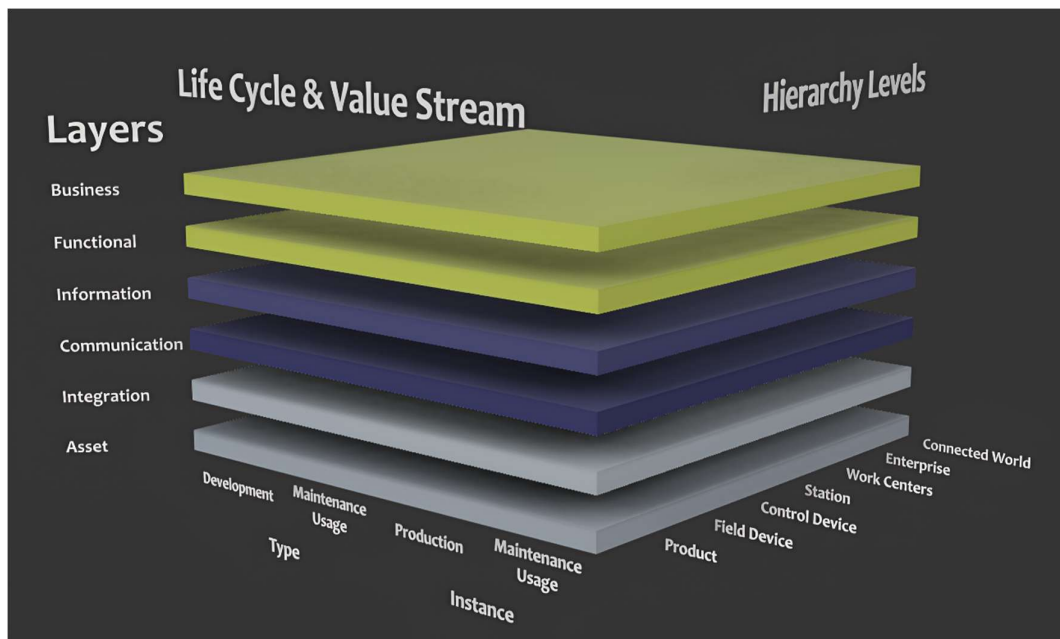


Figura 26 – Esquema tridimensional de la RAMI 4.0.

En el eje de jerarquía, el sistema se encuentra en “Centros de Trabajo” (Work Centers). Esto se debe a que en el recinto donde se realizará el cultivo hidropónico, coexisten diferentes procesos que trabajan en conjunto, como por ejemplo el sensado de variables ambientales, el control de temperatura e iluminación, entre otros.

Este espacio agrupa varias estaciones o tareas para trabajar de manera coordinada, existiendo una integración de diferentes subsistemas y funciones.

En el eje del ciclo de vida y flujo de valor, el sistema se encuentra en las fases de Development (desarrollo) ya que el sistema fue diseñado, configurado, y calibrado para cumplir con las funciones específicas. Esta fase incluye la planificación, construcción, y configuración inicial del sistema.

Finalmente, en el eje de las capas, el sistema se encuentra principalmente en tres capas:

- **Asset Layer (Capa de Activos):** Esta capa se aplica porque el sistema, representado por el gabinete metálico y todos los componentes físicos (sensores, actuadores, controladores), ha sido construido y configurado para cumplir con un propósito específico dentro del proceso de producción. El sistema en su conjunto es el activo que se está gestionando.
- **Integration Layer (Capa de Integración):** En esta capa, se han colocado todos los sensores y actuadores que permiten la transición entre el mundo físico y el digital. Estos dispositivos capturan datos del entorno físico (como la temperatura y el pH) y permiten que el sistema los almacene y responda mediante acciones específicas (como ajustar la iluminación o los niveles de nutrientes), logrando así una integración efectiva entre el mundo real y el digital.
- **Communication Layer (Capa de Comunicación):** El sistema también opera en esta capa, ya que se ha establecido la comunicación entre los diferentes componentes y las capas superiores, dando formato a los datos recolectados y seleccionando los protocolos de comunicación adecuados. Esto asegura que la información fluya eficientemente entre las diferentes capas y partes del sistema, lo cual es crucial para su operación continua y efectiva.

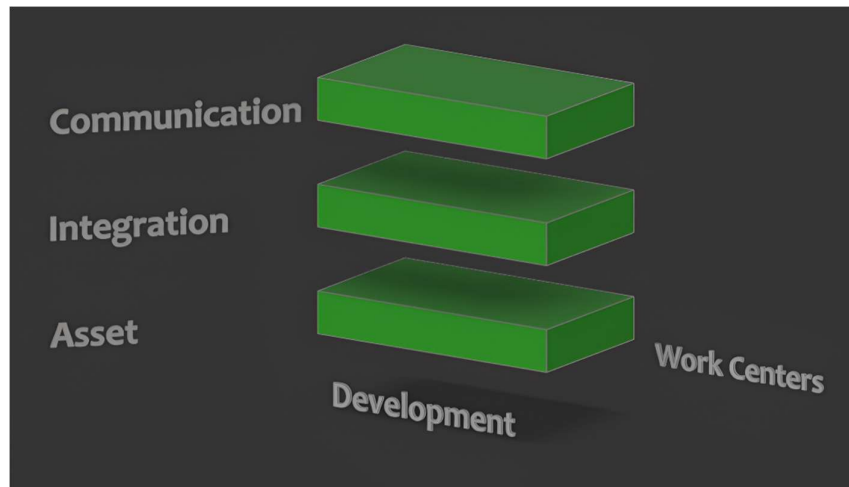


Figura 27 - Ubicación del proyecto dentro del esquema de la RAMI 4.0.

### 10.3 - Proceso de digitalización

En el contexto industrial del futuro, los componentes, dispositivos y aplicaciones estarán capacitados para comunicarse e interactuar de manera autónoma y colaborativa, garantizando una interoperabilidad fluida sin depender de las fronteras empresariales, industriales o nacionales, ni de un sistema centralizado. El concepto de Asset Administration Shell es el que Plattform Industrie 4.0 propone para alcanzar esta visión (Plattform Industrie 4.0 & ECLASS, 2021).

#### 10.3.1 - Asset Administration Shell (AAS)

El AAS es la implementación del "gemelo digital" para la Industria 4.0 y permite la interoperabilidad y la interacción entre organizaciones. En el mundo de la Industria 4.0, un activo está representado digitalmente por un AAS, el cual contiene una descripción de toda la información y las funcionalidades necesarias.

Dentro de este apartado del proyecto se creó la estructura del AAS mediante la utilización del software AASX Package Explorer (n.d.). Este programa permitió organizar y estructurar toda la información relevante en un formato estándar, siguiendo las directrices de la Industria 4.0. Para ello se especificó la jerarquía dentro del Sistema Hidropónico Autocontenido, utilizando submodelos y propiedades.

Los submodelos son componentes estructurados dentro del AAS que agrupan propiedades relacionadas para describir aspectos específicos del sistema. Cada submodelo tiene un propósito claro y está diseñado para organizar la información de manera lógica y comprensible.

Por otro lado, las propiedades dentro de cada submodelo son elementos individuales que contienen datos específicos, como medidas, estados, o configuraciones. Estas propiedades están descritas en detalle, incluyendo su valor, tipo de dato, y una descripción en varios idiomas. Las mismas permiten almacenar y comunicar información precisa sobre las características y el funcionamiento de los componentes del sistema.

Además, se sumó un último bloque con las “Concept Descriptions” del AAS. Éstas son definiciones detalladas que describen el significado y el contexto de las propiedades u otros elementos en el AAS. Están vinculadas a las propiedades mediante referencias semánticas, lo que garantiza que todos los datos asociados con esa propiedad se interpreten según un conjunto estándar y acordado de términos.

Estas últimas permiten que las propiedades tengan un significado comúnmente entendido, lo que es crucial cuando se intercambia información entre diferentes sistemas o cuando se necesita asegurar la interoperabilidad, proporcionando una explicación clara del tipo de dato, unidad de medida, y el contexto de uso, lo que ayuda a evitar malentendidos o errores en la interpretación de los datos.



Figura 28 - Vista general del AAS.

A continuación, se presentan capturas de pantalla del software utilizado, donde se aprecian los distintos submodelos con sus propiedades correspondientes. Además, las imágenes son acompañadas por tablas que describen cada una de las propiedades.

Submodelo “Nameplate”: Placa de identificación del Sistema Hidropónico Autocontenido.

Tabla 11 - Propiedades del submodelo Nameplate.

Propiedad	Descripción
SerialNumber	Número de serie del Sistema Hidropónico Autocontenido
Developers	Desarrolladores del Sistema Hidropónico Autocontenido

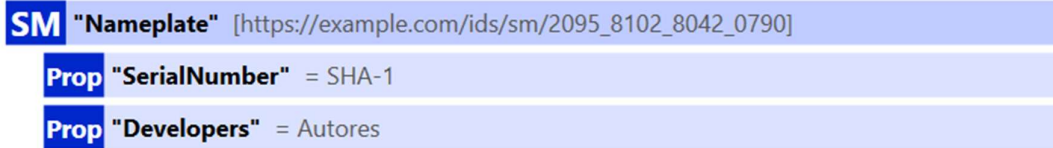


Figura 29 - Submodelo Nameplate.

Submodelo "TechnicalData": Datos técnicos del Sistema Hidropónico Autocontenido.

Tabla 12 - Propiedades del submodelo Technical Data.

Propiedad	Descripción
Crop	Tipo de cultivo
Cultivation	Código que identifica al proceso de cultivo
PotsNumber	Cantidad de recipientes utilizados para el cultivo
Tank1Additive	Aditivo agregado en el tanque 1
Tank2Additive	Aditivo agregado en el tanque 2
Tank3Additive	Aditivo agregado en el tanque 3
Tank4Additive	Aditivo agregado en el tanque 4
MainTankCapacity	Capacidad del tanque principal (0)
SecondaryTanksCapacity	Capacidad de los tanques secundarios (1,2,3,4)
TargetTempertatureValue	Valor de temperatura objetivo
TargetpHValue_min	Valor mínimo del rango de pH objetivo
TargetpHValue_max	Valor máximo del rango de pH objetivo
TargetECValue_min	Valor mínimo del rango de electroconductividad objetivo
TargetECValue_max	Valor máximo del rango de electroconductividad objetivo
Pump0OnTime	Tiempo de encendido de la bomba 0
Pump0OffTime	Tiempo de apagado de la bomba 0
Pump0MinimumOnTime	Tiempo mínimo de encendido de la bomba 0 para llenar todos los tubos
LEDOntime	Tiempo de encendido de los LEDs
LEDOffTime	Tiempo de apagado de los LEDs

SM	"TechnicalData" [https://example.com/ids/sm/7550_9102_8042_4124]
Prop	"Crop" = menta
Prop	"Cultivation" = menta-1
Prop	"PotsNumber" = 30
Prop	"Tank1Additive" = Regulador pH base
Prop	"Tank2Additive" = Regulador pH acido
Prop	"Tank3Additive" = Nutriente A
Prop	"Tank4Additive" = Nutriente B
Prop	"MainTankCapacity" = 0.00 [m3]
Prop	"SecondaryTanksCapacity" = 0.00 [m3]
Prop	"TargetTemperatureValue" = 0.00 [°C]
Prop	"TargetpHValue_min" = 0.00
Prop	"TargetpHValue_max" = 0.00
Prop	"TargetECValue_min" = 0.00
Prop	"TargetECValue_max" = 0.00
Prop	"Pump0OnTime" = 0 [min]
Prop	"Pump0OffTime" = 0 [min]
Prop	"Pump0MinimumOnTime" = 0 [min]
Prop	"LEDOntime" = 0 [min]
Prop	"LEDOffTime" = 0 [min]

Figura 30 - Submodelo TechnicalData.

Submodelo "OperationalData": Datos operacionales en tiempo real del Sistema Hidropónico Autocontenido.

Tabla 13 - Propiedades del submodelo OperationalData.

Propiedad	Descripción
IndoorTemperature	Temperatura en el interior del sistema
OutdoorTemperature	Temperatura en el exterior del sistema
SolutionTemperature	Temperatura de la solución que recorre todo el sistema
RelativeHumidity	Humedad relativa del interior del sistema
pH	pH de la solución
EC	Electroconductividad de la solución
IlluminationLevel	Nivel de iluminación
LED1State	Estado de los LEDs del primer estante
LED2State	Estado de los LEDs del segundo estante
Pump0State	Estado de la Bomba 0, situada en el tanque principal
Pump1State	Estado de la Bomba 1, situada en el tanque secundario 1
Pump2State	Estado de la Bomba 2, situada en el tanque secundario 2
Pump3State	Estado de la Bomba 3, situada en el tanque secundario 3
Pump4State	Estado de la Bomba 4, situada en el tanque secundario 4
Fan0State	Estado de los ventiladores encargados de la refrigeración de los LEDs
Fan1State	Estado de la primera columna de ventiladores
Fan2State	Estado de la segunda columna de ventiladores

Fan3State	Estado de la tercera columna de ventiladores
-----------	--

<b>SM</b>	<b>"OperationalData"</b> [ <a href="https://example.com/ids/sm/6442_4110_7042_2863">https://example.com/ids/sm/6442_4110_7042_2863</a> ]
<b>Prop</b>	<b>"IndoorTemperature"</b> = 0.00 [°C]
<b>Prop</b>	<b>"OutdoorTemperature"</b> = 0.00 [°C]
<b>Prop</b>	<b>"SolutionTemperature"</b> = 0.00 [°C]
<b>Prop</b>	<b>"RelativeHumidity"</b> = 0.00 [%]
<b>Prop</b>	<b>"pH"</b> = 0.00
<b>Prop</b>	<b>"EC"</b> = 0.00
<b>Prop</b>	<b>"IlluminationLevel"</b> = 0.00 [%]
<b>Prop</b>	<b>"LED1State"</b> = 0
<b>Prop</b>	<b>"LED2State"</b> = 0
<b>Prop</b>	<b>"Pump0State"</b> = 0
<b>Prop</b>	<b>"Pump1State"</b> = 0
<b>Prop</b>	<b>"Pump2State"</b> = 0
<b>Prop</b>	<b>"Pump3State"</b> = 0
<b>Prop</b>	<b>"Pump4State"</b> = 0
<b>Prop</b>	<b>"Fan0State"</b> = 0
<b>Prop</b>	<b>"Fan1State"</b> = 0
<b>Prop</b>	<b>"Fan2State"</b> = 0
<b>Prop</b>	<b>"Fan3State"</b> = 0

Figura 31 - Submodelo OperationalData.

Submodelo "Components": Información de los componentes del Sistema Hidropónico Autocontenido.

Tabla 14 - Propiedades del submodelo Components.

Propiedad	Descripción
Dimensions	Dimensiones del sistema
ProcessingUnit	Modelo de la unidad de procesamiento
pHSensor	Modelo del sensor pH
ECSensor	Modelo del sensor de electroconductividad
Flowmeter	Modelo de los caudalímetros
LightLevelSensor	Modelo del sensor de nivel de iluminación
Temperature_HumiditySensor	Modelo del sensor de temperatura y humedad
SolutionTemperatureSensor	Modelo del sensor de temperatura de la solución
MainPump	Modelo de la bomba principal
SecondaryPumps	Modelo de las bombas secundarias
Fans	Modelo de los ventiladores
LEDs	Modelo de las luces LED

<b>SM</b>	<b>"Components"</b> [https://example.com/ids/sm/4053_2252_8042_5277]
<b>Prop</b>	<b>"Dimensions"</b>
<b>Prop</b>	<b>"ProcessingUnit"</b> = Arduino Mega 2560
<b>Prop</b>	<b>"pHSensor"</b> = pH sensor PH-4502C + Measurement Probe E-201-C
<b>Prop</b>	<b>"ECSensor"</b> = KS0429 keystudio TDS Meter V1.0
<b>Prop</b>	<b>"Flowmeter"</b> = Yf-s401
<b>Prop</b>	<b>"LightLevelSensor"</b> = NORP12 RS
<b>Prop</b>	<b>"Temperature_HumiditySensor"</b> = DHT22
<b>Prop</b>	<b>"SolutionTemperatureSensor"</b> = DS18B20
<b>Prop</b>	<b>"MainPump"</b> = RS-932
<b>Prop</b>	<b>"SecondaryPumps"</b> = Vertical 100L/h 5V
<b>Prop</b>	<b>"Fan"</b> = DITRON SK-COOL2(R.C.F)
<b>Prop</b>	<b>"LEDs"</b> = Full Spectrum 50w

Figura 32 - Submodelo Components.

Por último, se presenta una captura de las Concept Descriptions utilizadas. Las mismas se utilizan para informar las unidades de las distintas variables y parámetros, como [°C] para la temperatura y [m<sup>3</sup>] para el volumen.

<b>Env</b>	<b>"ConceptDescriptions"</b>
<b>CD</b>	<b>"TemperatureUnit"</b> https://example.com/ids/cd/9353_8102_8042_8986
<b>CD</b>	<b>"VolumeUnit"</b> https://example.com/ids/cd/0472_9102_8042_2778
<b>CD</b>	<b>"Percentage"</b> https://example.com/ids/cd/1372_9102_8042_8933
<b>CD</b>	<b>"TimeUnitMinutes"</b> https://example.com/ids/cd/4185_9102_8042_7905

Figura 33 - Concept Descriptions.

Como se mencionó, todo lo realizado en este apartado corresponde al "esqueleto" del AAS. Sin embargo, para darle "vida" a este AAS, se necesita llevarlo más allá de esta estructura inicial. Esto implica conectar los elementos virtuales definidos en el AAS con los datos reales del sistema.

Para ello se almacenará la estructura definida del AAS en la placa Raspberry Pi, la cual a su vez estará periódicamente recibiendo los datos en tiempo real enviados por el Arduino.

Los estudiantes de Ingeniería en Sistemas de Información participantes del Proyecto de Investigación y Desarrollo donde el presente trabajo se enmarca serán los encargados de desarrollar un servidor que permita vincular todo lo mencionado y darle vida al AAS.



## 11 - Evaluación del funcionamiento y resultados de las pruebas

### 11.1 - Control PID

El uso del método Ziegler-Nichols en el ajuste de controladores PID es una técnica popular debido a su simplicidad y efectividad en proporcionar valores iniciales para los parámetros de control. Sin embargo, es importante entender que este método es solo un punto de partida y admite una etapa posterior donde se deben probar los valores obtenidos en el sistema real.

Una vez obtenidos los parámetros iniciales mediante Ziegler-Nichols, se utilizaron para configurar el control PID dentro del código Arduino.

Con el código funcionando, se procedió a realizar pruebas y ajustar los valores manualmente para obtener la calibración final, resultando:

$$K_p = 14.12 \quad K_i = 0.12 \quad K_d = 223.53$$

De esta manera, la temperatura se regula correctamente y permite situarla por debajo de la temperatura marcada como setpoint, la cual a su vez podría ser conceptualmente considerada un límite.

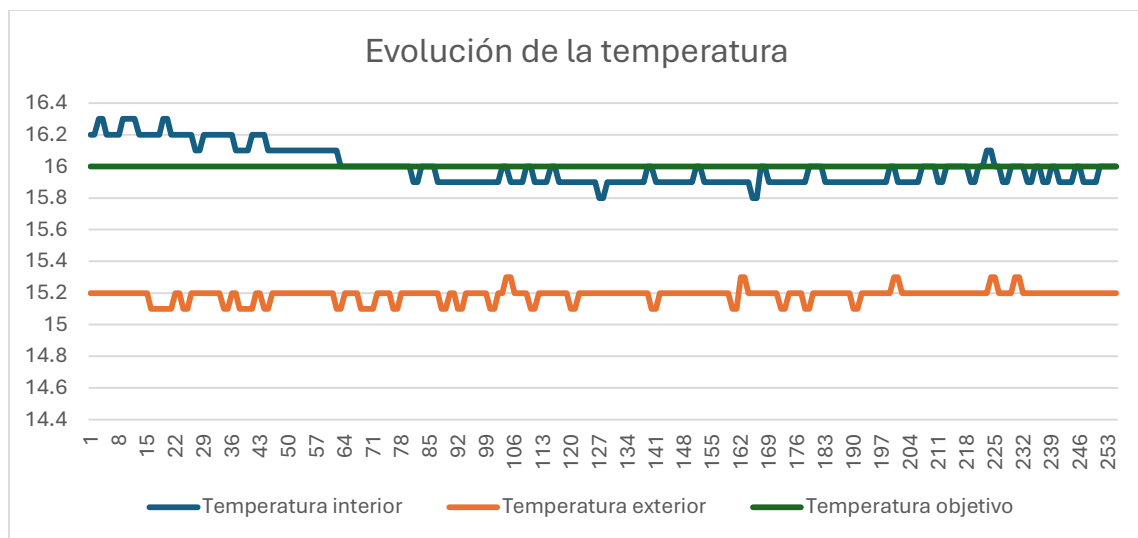


Figura 34 - Evolución de la temperatura al aplicar el control PID.

Se puede observar en la siguiente imagen que los ventiladores responden al valor calculado como salida del PID estando encendidos (representado por el valor 10) cuando esta así lo requiere.

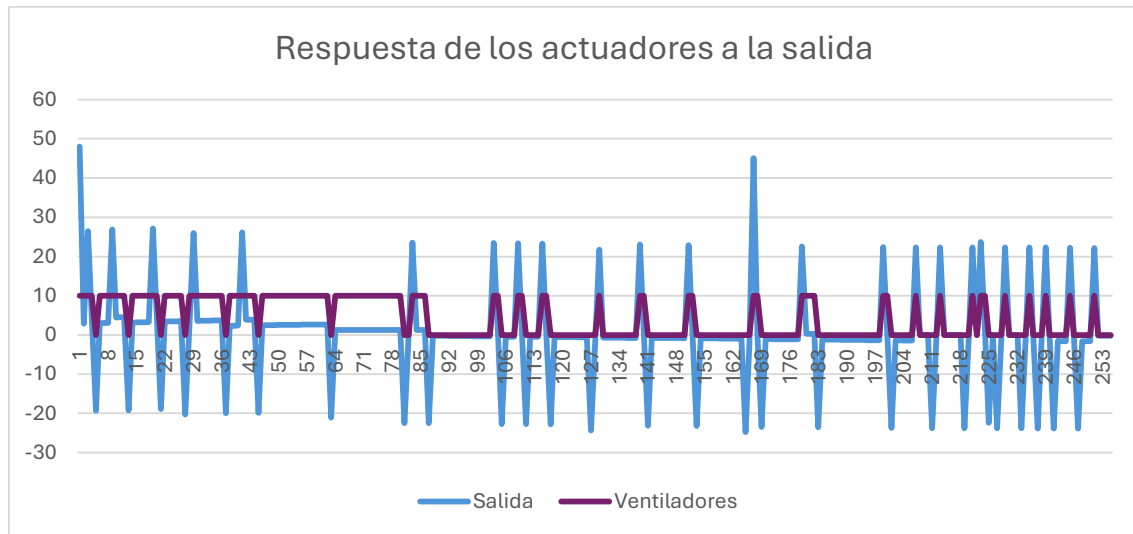


Figura 35 - Respuesta de los ventiladores a la salida del cálculo PID.

Como se mencionó en la sección que describe el cálculo de los parámetros de configuración de este método de control, la actuación debería ser idealmente llevada a cabo por un dispositivo que permita una variación continua y no que trabaje solo con dos valores lógicos, como es el caso de los ventiladores utilizados en este proyecto, los cuales, por acción de un relé, solo pueden encenderse y apagarse.

## 11.2 - Envío de datos

Para el envío de datos, se configuró el código para poder imprimir en formato JSON en el puerto Serie como se muestra en la Figura 36.

En primer lugar, se evalúa si el puerto está efectivamente disponible y se aguarda por la llegada de un comando, en este caso, la letra "P". La placa Raspberry será la encargada de imprimir en el puerto serie este comando para que, una vez que el Arduino lo lea, imprima los datos en formato JSON en el mismo puerto.

```
// Código para imprimir en el puerto Serie:
if (Serial.available()) {
  char command = Serial.read();
  if (command == 'P') {

    // Crear el documento JSON
    StaticJsonDocument<JSON_BUFFER_SIZE> doc;
```

Figura 36 - Preparación para el envío de datos.

Al recibirse el comando se comienza a generar el JSON con sus claves (nombres predefinidos en el AAS) y sus valores, los cuales se extraen de las variables del código que los almacenan.

```
// Completar el JSON con sus claves y valores
doc["T_int"] = temp_value_int;
doc["H_int"] = hum_value_int;
doc["T_ext"] = temp_value_ext;
doc["T_solu"] = Wtemp0_value;
doc["pH_value"] = pH_value;
doc["EC_value"] = EC_value;
doc["LDR_value"] = LDRvalue;
doc["T_setpoint"] = limit_temp;
doc["pH_setpoint_min"] = pH_low;
doc["pH_setpoint_max"] = pH_high;
doc["EC_setpoint_min"] = EC_low;
doc["EC_setpoint_max"] = EC_high;
doc["b0_OnTime"] = interval_bomba_on;
doc["b0_OffTime"] = interval_bomba_off;
doc["LED_OnTime"] = interval_LED_on;
doc["LED_OffTime"] = interval_LED_off;
doc["LED1_st"] = LED_state;
doc["LED2_st"] = LED_state;
doc["b0_st"] = b0_state;
doc["b1_st"] = b1_state;
doc["b2_st"] = b2_state;
doc["b3_st"] = b3_state;
doc["b4_st"] = b4_state;
doc["vent0_st"] = v0_state;
doc["vent1_st"] = v1_state;
doc["vent2_st"] = v2_state;
doc["vent3_st"] = v3_state;
```

Figura 37 - Estructuración de los datos en formato JSON.

Una vez completo el JSON, se crea y se imprime en el puerto serie, donde la placa Raspberry se encarga de leerlo y posteriormente procesarlo.

```
// Crear un objeto String para almacenar el JSON
String jsonString;
serializeJson(doc, jsonString);

// Imprimir el JSON en el puerto Serie
Serial.println(jsonString);
}
}
}
```

Figura 38 - Impresión de datos en el puerto serie.

A continuación, se muestra una captura ejemplo de los datos transmitidos por el puerto Serie en formato JSON.

```
{ "T_int": 18.2, "H_int": 88.3, "T_ext": 17.6, "T_solu": 18.1, "pH_value": 7.0,  
  "EC_value": 50, "LDR_value": 765, "T_setpoint": 18.3, "ph_setpoint_min": 6.0,  
  "ph_setpoint_max": 8.0, "EC_setpoint_min": 55, "EC_setpoint_max": 65,  
  "b0_OnTime": 60, "b0_OffTime": 180, "LED_OnTime": 60, "LED_OffTime": 60,  
  "LED1_st": 1, "LED2_st": 1, "b0_st": 1, "b1_st": 0, "b2_st": 0, "b3_st": 0,  
  "b4_st": 0, "vent0_st": 1, "vent1_st": 0, "vent2_st": 0, "vent3_st": 0  
}
```

Figura 39 - Ejemplo de datos enviados por el puerto serie.

### 11.3 - Control pH

Tanto para la función que controla el pH como la que controla la electroconductividad de la solución se utiliza la misma lógica:

1. Se trabaja por intervalos de tiempo. Al comienzo del código se define cada cuanto se debe medir.
2. Se ejecuta la función que lee el valor del sensor (en este caso simulado por un potenciómetro) y se almacena en una variable.
3. Se compara el valor obtenido con los límites mínimos y máximos del rango que se definió como aceptable. En caso de que supere alguno de ellos, se incrementa un contador, positivo para valores superiores y negativo para inferiores. En caso de que la medición se encuentre en valores aceptables, se reinicia el contador.
4. Se chequea si se produjeron más de 3 medidas consecutivas por fuera del rango aceptable, ejecutando las funciones que hacen funcionar las bombas secundarias correspondientes. Si el pH está por encima del rango, la bomba secundaria 1 introduce una solución ácida y, si se encuentra por debajo, la bomba secundaria 2 introduce una solución alcalina.

```
//pH control
void pHcontrol(unsigned long pH_time) {
  unsigned long currentMillis_pH = millis();
  if (currentMillis_pH - previousMillis_pH >= pH_time) {
    previousMillis_pH = currentMillis_pH;
    float pH_value = pH_read(); //Actualmente simulado con potenciómetro

    //Evaluar en que rango se encuentra el pH
    if (pH_value > pH_high) {
      pH_samples++;
    } else if (pH_value < pH_low) {
      pH_samples--;
    } else {
      pH_samples = 0;
    }

    //Chequear si se produjeron mas de 3 muestras fuera del rango aceptable
    if (abs(pH_samples) >= 3) {
      if (pH_samples > 0) {
        b1_on(100.0); //Actuar con la bomba 1 para reducirlo
      } else {
        b2_on(100.0); //Actuar con la bomba 2 para aumentarlo
      }
      //Si se encuentra dentro del rango aceptado, se resetea el contador
      pH_samples = 0;
    }
  }
}
```

Figura 40 - Código Arduino de la función encargada de la regulación del pH.

La evaluación de la respuesta de las bombas a los valores de pH simulados con potenciómetros resultó exitosa y con los datos obtenidos, se trazaron las gráficas que se presentan a continuación.

Como se mencionó, el valor de pH fue simulado con un potenciómetro. Se definió a los valores entre 6 y 8 como rango aceptable de pH y se realizó una prueba con valores por encima y por debajo de los límites.

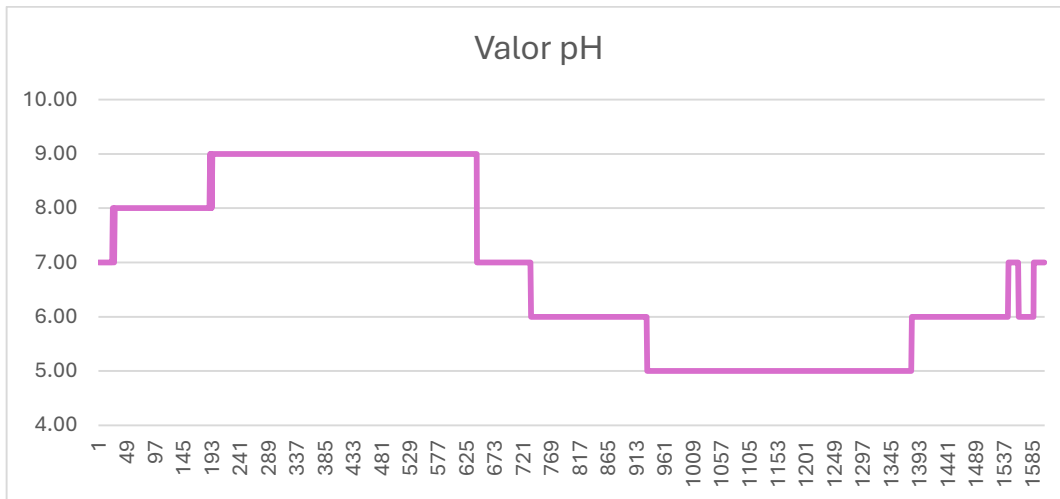


Figura 41 - Valor de pH simulado con un potenciómetro.

Se puede observar en la gráfica “Muestras” que instantes antes de llegar a las tres muestras positivas se produjeron algunas mediciones por encima del valor aceptado de pH, pero no las suficientes como para obtener tres consecutivas. Este mecanismo se utilizó como filtro para evitar que una medición errónea pueda afectar al sistema. En este caso de prueba se utilizó el valor “3” pero como se aprecia en el código, podría configurarse a otro valor. Solo se actuará si se alcanza dicha cantidad de medidas consecutivas fuera del rango aceptado.

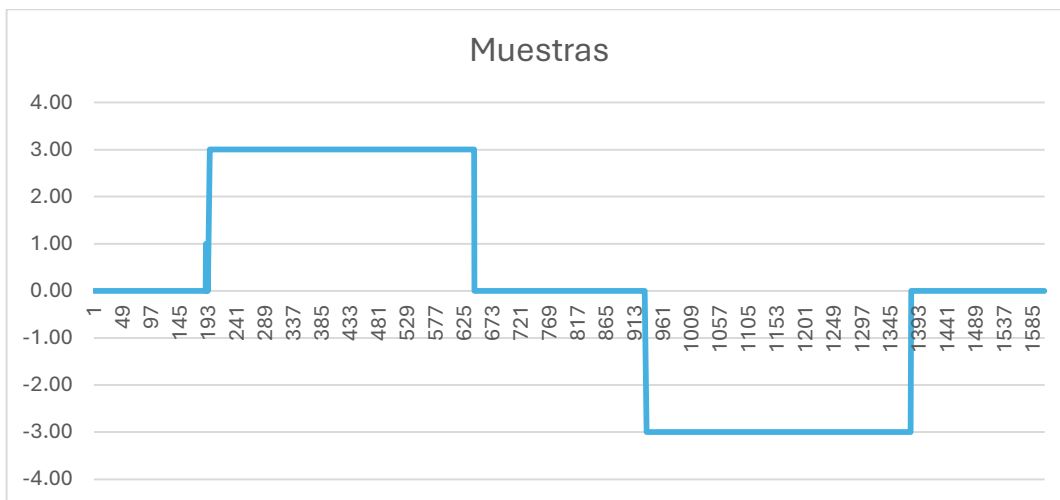


Figura 42 - Respuesta del contador que almacena la cantidad de muestras por fuera de los límites establecidos.

En el caso de las bombas, cuando la lógica del código les indica que deben actuar, estas se encienden hasta que los caudalímetros detecten que los atravesó el volumen de solución que se brinda como parámetro cuando se ejecuta la función. Por ejemplo, la sentencia

b1\_on(100.00) indica que se deben suministrar 100 [ml] de la solución que se encuentra en el tanque secundario 1.

Este valor fue seleccionado para las pruebas, pero una vez en funcionamiento el sistema, debe calcularse según el valor de pH medido y el deseado.

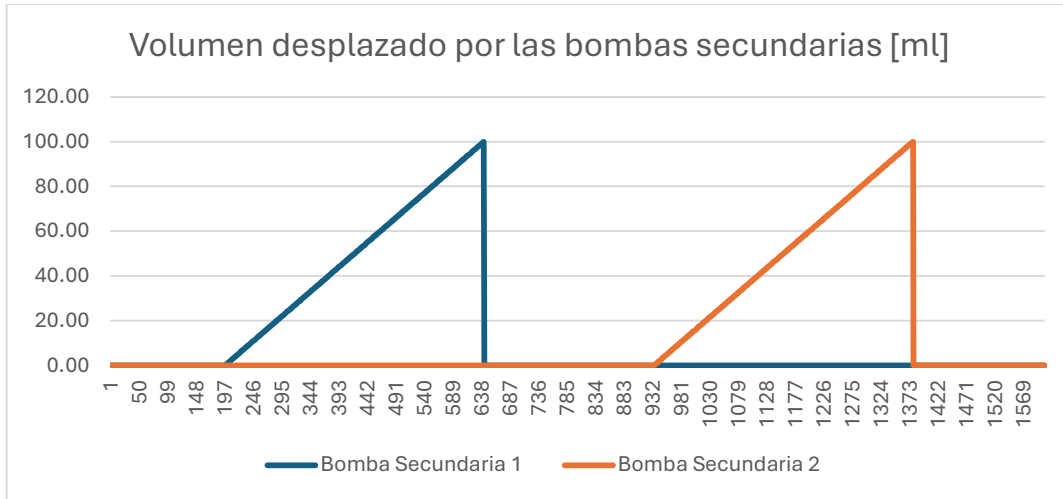


Figura 43 - Actuación de las bombas secundarias.

A continuación, se presentan las gráficas superpuestas para lograr una mayor apreciación de la respuesta del sistema.

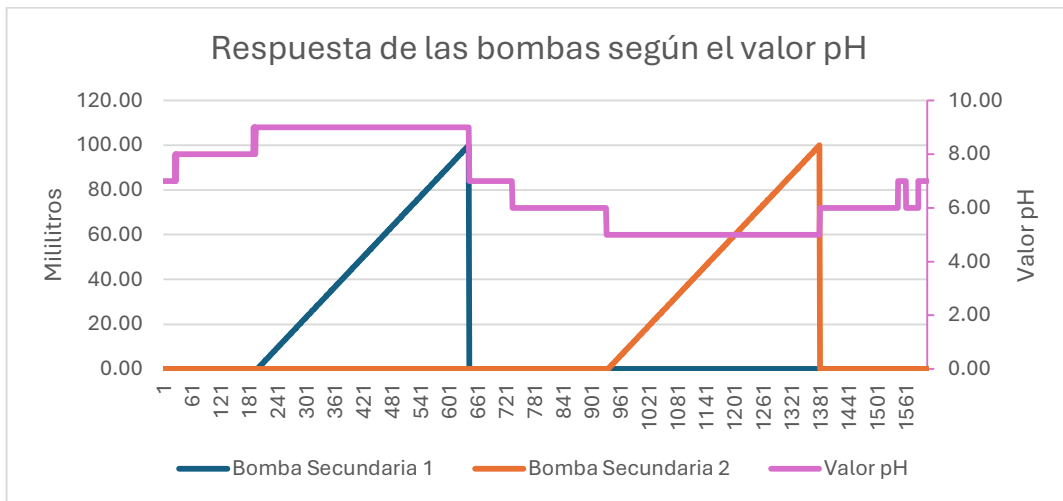


Figura 44 - Superposición del valor de pH y la acción de las bombas secundarias.

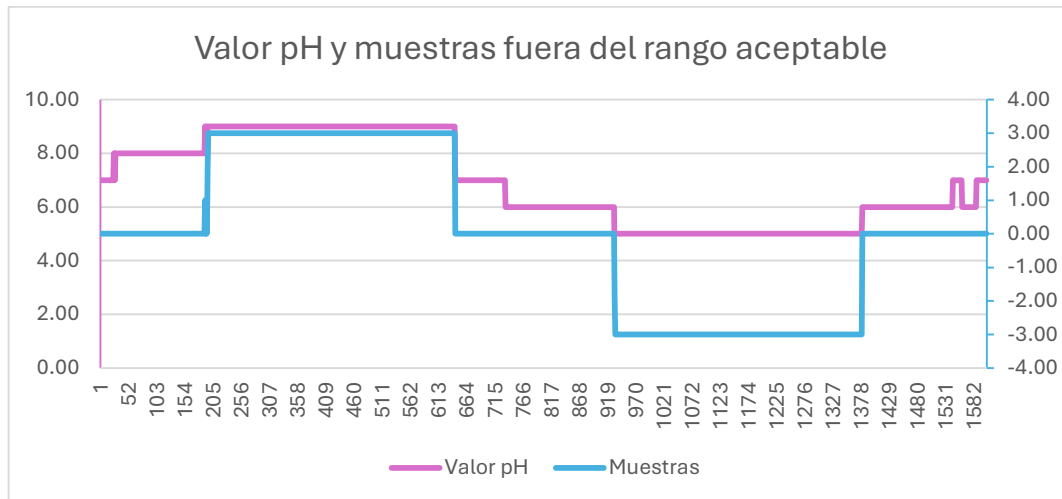


Figura 45 - Superposición del valor de pH y las muestras correspondientes.

## 11.4 - Asset Administration Shell

Para evaluar el AAS se brindó un archivo en formato XML extraído del software AASX Package Explorer con el que se diseñó y se lo dejó a disposición a los estudiantes de Ingeniería en Sistemas de Información para su proyecto.

Mediante este archivo se tiene acceso al “esqueleto” del AAS, lo que permite interpretar cada uno de los datos enviados por el puerto Serie. Cada valor que se envía está acompañado por una clave que, comparándola con el archivo XML, se puede contextualizar y entender que representa.

Todo esto será ejecutado en un servidor alojado en la placa Raspberry, tarea que pertenece a su proyecto y resulta una etapa posterior a la realización de este informe, por lo que se decidió comprobar la comunicación y recepción de los datos.

Para esto se pusieron en funcionamiento ambas placas y se las conectó mediante el puerto Serie. Al detectar el comando “P” provisto por la Raspberry, el Arduino imprimió el documento JSON, el cual fue exitosamente recibido por la Raspberry.

## 11.5 - Encendido de bomba principal

La última prueba que se realizó fue la evaluación experimental del tiempo que debe estar encendida la bomba para lograr llevar la solución del tanque principal a todos los tubos del sistema, donde se encontrarán situadas las plantas.

Esta prueba se hizo de manera experimental y no matemática ya que el conducto que sale hacia los tubos superiores y por el cual pasa todo el fluido desplazado por la bomba cuenta



con un retorno que tiene un doble propósito: evitar un caudal muy grande y agitar el contenido del tanque principal, permitiendo la homogenización de la solución. Este retorno se logra con una válvula de derivación que se regula de forma manual.

La ejecución de esta prueba dio como resultado 2 minutos, tiempo mínimo que debe estar encendida la bomba para suministrar el volumen de solución necesario para llegar a todas las plantas.

## 12 – Conclusiones y Trabajos Futuros

### 12.1 – Conclusiones del trabajo

Los principales objetivos de este trabajo fueron cumplidos satisfactoriamente.

Por un lado, el desarrollo de una automatización para el sistema hidropónico autocontenido concluye en un prototipo funcional que, luego de la selección e instalación de sensores y actuadores, se encarga de medir y controlar los parámetros más importantes para el cultivo de plantas.

Algunos de ellos son controlados con métodos más sencillos, como actuación por superación de valores límites y otras, como la temperatura, controladas por un sistema PID que permite una actuación más eficiente y la posibilidad de complejizarlo y mejorarlo en futuras etapas. El sistema de control PID fue implementado con éxito, utilizando el método de Ziegler-Nichols para ajustar los parámetros del controlador. El algoritmo PID demostró una capacidad efectiva para regular la temperatura del ambiente, manteniéndola dentro de un rango de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  del valor objetivo.

Por otro lado, se logró la propuesta de digitalización del sistema, contextualizándolo dentro del esquema propuesto por la RAMI 4.0. Esta digitalización permitió no solo la integración de los componentes del sistema en un modelo digital, sino también la apertura hacia la comunicación con sistemas más complejos. Al implementarlo dentro del marco de RAMI 4.0, se establecieron las bases para conectar los activos físicos con plataformas de gestión y control más avanzadas, facilitando una interoperabilidad más fluida y una integración más eficiente con otras tecnologías emergentes en el ámbito de la Industria 4.0.

Este avance no solo sienta las bases para una gestión más eficaz de los activos, sino que también abre la puerta a futuras mejoras y adaptaciones del sistema, permitiendo la incorporación de nuevas funcionalidades y la conexión con sistemas más amplios para una mayor automatización y optimización de procesos.

El impacto de este proyecto se extiende más allá del ámbito académico y presenta una primera etapa de desarrollo de un sistema de estas características. Además, la tecnología desarrollada puede ser adaptada para otros entornos controlados, como invernaderos, laboratorios y centros de producción, donde el control de los parámetros de crecimiento es crucial. En la comunidad, este tipo de tecnología puede contribuir a la seguridad alimentaria, al desarrollo de nuevas formas de cultivo, a la obtención de mayores rendimientos y a la promoción de prácticas agrícolas más sostenibles y eficientes.

Otro aspecto destacable radica en que el sistema, originalmente diseñado para el cultivo de plantas de menta, podría modificar su configuración y tamaño y no solo adaptarse a distintas condiciones ambientales sino tener la posibilidad de utilizarlo para otros cultivos.

Uno de los principales desafíos encontrados en el proyecto fue la resolución limitada de los sensores, como por ejemplo el DHT22, que proporciona datos con una precisión de solo un decimal. Esta limitación en la resolución afectó la capacidad para obtener una curva de respuesta precisa durante la calibración del control PID. Dado que el sensor no puede proporcionar datos más detallados, el ajuste fino del controlador PID se vio comprometido, ya que el error en la medición y la variabilidad en el tiempo resultaron más significativos. Esto dificultó la implementación y requirió ajustes manuales adicionales para mitigar el impacto en el rendimiento del sistema.

Durante el desarrollo de este proyecto, el alumno tuvo la oportunidad de integrar un equipo interdisciplinario, lo cual facilitó un amplio intercambio de conocimientos y perspectivas diversas. Esta colaboración enriqueció la comprensión del proyecto y mejoró la calidad del trabajo final.

La experiencia práctica de seleccionar e instalar componentes, calibrar, testear y lograr un sistema funcional ha proporcionado valiosas lecciones sobre cómo trabajar con distintos componentes, especialmente en lo que respecta a componentes de bajo costo. Este conocimiento práctico ayudará a tomar decisiones informadas sobre qué implementar y qué evitar en futuros proyectos, optimizando así el uso de recursos y la efectividad.

Además, debió enfrentarse diversos desafíos que requirieron la aplicación de habilidades de resolución de problemas y pensamiento crítico. La capacidad para identificar, analizar y resolver problemas técnicos ha sido esencial para el éxito del proyecto. Estos desafíos han permitido mejorar las habilidades en la investigación y el análisis, buscando soluciones efectivas y evaluando diferentes enfoques.

También permitió continuar adentrándose en los conceptos de la Industria 4.0, un campo que está ganando cada vez más relevancia en el mundo actual. Esta inmersión en las tendencias emergentes ayudará a enfrentar los desafíos tecnológicos del futuro y permitirá adaptarse a las innovaciones que surgirán en el ámbito de la ingeniería y la automatización.

## 12.2 - Recomendaciones y trabajos futuros

### 12.1.1 - Instalación de sensores

Como se mencionó, al momento de redacción de este documento, resta instalar los sensores de pH y de electroconductividad. Estos sensores son fundamentales para monitorear la calidad del entorno de cultivo y garantizar que las condiciones sean las adecuadas para el crecimiento de las plantas.

El sensor de pH mide la acidez o alcalinidad del agua, mientras que el sensor de electroconductividad evalúa la concentración de sales y nutrientes en la solución. Para asegurar que ambos sensores proporcionen lecturas precisas, es crucial realizar una calibración adecuada.

La calibración del sensor de pH se realiza utilizando soluciones buffer con valores de pH conocidos. Esto ajusta el sensor para que sus lecturas correspondan a los niveles de acidez o alcalinidad reales. De manera similar, el sensor de electroconductividad debe calibrarse con soluciones de referencia que tengan concentraciones conocidas de sales. Esto garantiza que las lecturas del sensor reflejen con precisión la cantidad de nutrientes presentes en la solución.

### 12.1.2 - Revisión del control PID

El sistema de control PID implementado ha demostrado funcionar correctamente en las condiciones actuales. Este sistema ha sido diseñado para regular la temperatura de manera efectiva en el entorno controlado, utilizando los parámetros calculados. Sin embargo, es importante tener en cuenta que cuando se introduzcan cambios significativos en el sistema, como la adición de plantas u otros factores que puedan afectar el entorno, el rendimiento del PID podría verse alterado.

En situaciones futuras, donde las condiciones del sistema cambien, como la incorporación de plantas, el comportamiento térmico del entorno también puede variar. Las plantas pueden afectar la temperatura de diferentes maneras, como al introducir humedad adicional o al modificar el flujo de aire y la radiación térmica. Estos cambios podrían influir en la precisión del control de temperatura, haciendo necesario revisar y ajustar los parámetros del PID.

Por lo tanto, cuando se agreguen plantas o se produzcan otros cambios en el entorno, será recomendable evaluar nuevamente el sistema de control. Esto puede implicar recalcular los parámetros del PID para adaptarse a las nuevas condiciones o realizar ajustes manuales según sea necesario. Ajustar los parámetros del PID asegurará que el sistema siga

funcionando de manera óptima, manteniendo la temperatura dentro del rango deseado y garantizando el bienestar de las plantas.

### 12.1.3 - Instalación de display local

Incorporar un display LCD podría resultar de gran utilidad por varias razones. Permitiría una visualización local y en tiempo real de variables críticas del sistema, como temperatura, humedad, niveles de pH, y concentraciones de nutrientes, o cualquiera que se le configure. Este display local funcionaría como un respaldo en caso de que el servidor, donde normalmente se envían y visualizan los datos, experimente problemas de conectividad.

Con el LCD, se tendría acceso inmediato a los datos más importantes sin necesidad de depender de sistemas o dispositivos externos. Esto puede ser especialmente útil durante el mantenimiento o la resolución de problemas, cuando es necesario tomar decisiones rápidas basadas en las condiciones actuales del sistema. Además, el display podría programarse para mostrar alertas o advertencias si alguna de las variables supera los umbrales predefinidos, proporcionando una capa adicional de monitoreo que no depende de la conectividad a internet o de la disponibilidad del servidor.

### 12.1.4 - Medir irradiancia

Podría resultar interesante en etapas más avanzadas del proyecto medir la irradiancia a la que están expuestas las plantas.

La primera opción podría llevarse a cabo con el LDR instalado, lo cual no es imposible, pero implicaría calibrarlo, comparando sus lecturas con un dispositivo de referencia, como un luxómetro o radiómetro. En este proceso, debería exponerse el LDR a diferentes niveles de luz, registrando los valores obtenidos junto con las mediciones del dispositivo de referencia. Luego, se ajustaría una curva matemática que relaciona las lecturas del LDR con la irradiancia real. Finalmente, esta relación se podría incorporar en el código del Arduino para convertir automáticamente las lecturas en unidades de irradiancia, como lux o watts por metro cuadrado, asegurando mediciones precisas.

Una segunda opción para medir la irradiancia con mayor precisión sería reemplazar el LDR por un sensor diseñado específicamente para medir la luz o la irradiancia, como un fotodiodo, un sensor de luz digital, o un sensor de irradiancia. Estos sensores están calibrados de fábrica y ofrecen lecturas en unidades estándar como lux o watts por metro cuadrado, eliminando la necesidad de realizar una calibración manual compleja. Además, suelen ser más precisos y menos sensibles a variaciones no deseadas que un LDR, lo que puede mejorar la exactitud de las mediciones en aplicaciones críticas.

### 12.1.5 - Conexión a un punto de tierra común

Cuando se trabaja con sistemas electrónicos y de control, como los que involucran un Arduino, es crucial que todas las conexiones a tierra (GND) estén unidas en un punto común. Esta práctica es fundamental para garantizar el correcto funcionamiento del circuito y evitar problemas que podrían afectar la estabilidad y precisión del sistema.

La conexión a tierra actúa como una referencia común para todas las señales eléctricas en un circuito. Si diferentes partes de un sistema tienen puntos de tierra separados, pueden existir pequeñas diferencias de voltaje entre estas tierras. Estas diferencias, aunque pequeñas, pueden generar ruidos o fluctuaciones indeseadas en las señales, especialmente en circuitos de control y medición, donde la precisión es crucial.

En un sistema controlado por Arduino, tener todas las tierras conectadas juntas asegura que el microcontrolador, los sensores, actuadores, y otros componentes compartan la misma referencia de voltaje. Esto es esencial para que las mediciones sean precisas y para que el control de los actuadores sea estable y predecible.

Si las tierras no están unidas, se pueden producir bucles de tierra, que son corrientes no deseadas que fluyen entre diferentes puntos de tierra. Estos bucles pueden introducir ruido en las señales analógicas, hacer que los sensores midan incorrectamente, y que los actuadores respondan de manera errática.

### 12.1.6 - Reinicio automático de Arduino

Cuando se abre el puerto serie en un Arduino, el microcontrolador se reinicia automáticamente. Esto sucede debido a cómo está diseñado el hardware, en particular la interacción entre la línea DTR (Data Terminal Ready) y la línea de reset del microcontrolador.

Al abrir el puerto serie desde, por ejemplo, la computadora, ésta envía una señal a la línea DTR del chip USB a serie del Arduino. Esta línea DTR está conectada a la línea de reset del microcontrolador a través de un pequeño capacitor. Cuando DTR se activa, genera un pulso en la línea de reset, lo que provoca que el Arduino se reinicie. Este comportamiento es intencional y útil durante la programación, ya que permite que el bootloader del Arduino se prepare para recibir nuevo código. Sin embargo, este reinicio automático puede ser indeseado si solo se quiere abrir el puerto serie para monitorear datos sin que el Arduino se reinicie.

En el caso particular de este proyecto resulta totalmente contraproducente que la placa se reinicie, ya que, por ejemplo, muchos de los procesos de control y actuación son llevados a cabo por intervalos de tiempo, los cuales podrían verse alterados e interferirían con el correcto funcionamiento del sistema.

Para evitar que el Arduino se reinicie al abrir el puerto serie, se puede agregar un capacitor de 10  $\mu\text{F}$  entre el pin de RESET y GND. Este capacitor actúa como un filtro, absorbiendo el pico de voltaje generado por la señal DTR y estabilizando la línea de reset, lo que evita el reinicio del microcontrolador. De esta forma, se logra abrir el puerto serie para monitorear datos sin que se produzca un reinicio.

Además, se podría agregar un switch que permita conectar o desconectar el capacitor a voluntad. Cuando se desee cargar un nuevo sketch en el Arduino, puede abrirse el switch para desconectar el capacitor, lo que permitirá que el microcontrolador se reinicie automáticamente al abrir el puerto serie, activando el bootloader y permitiendo la carga del nuevo código. Una vez que el código esté cargado, puede cerrarse el switch para reconectar el capacitor, evitando así que el Arduino se reinicie cuando el puerto serie es abierto para monitorear datos.

## 13 - Anexos

Planilla con los datos de temperatura y tiempo para armar el PID

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
0.50	18.9	42.50	20.4	84.50	20.4
1.00	18.8	43.00	20.4	85.00	20.4
1.50	19	43.50	20.4	85.50	20.4
2.00	19	44.00	20.4	86.00	20.5
2.50	19	44.50	20.4	86.50	20.5
3.00	19.1	45.00	20.3	87.00	20.4
3.50	19.2	45.50	20.4	87.50	20.5
4.00	19.1	46.00	20.4	88.00	20.5
4.50	19.2	46.50	20.4	88.50	20.5
5.00	19.2	47.00	20.4	89.00	20.5
5.50	19.2	47.50	20.4	89.50	20.6
6.00	19.3	48.00	20.4	90.00	20.5
6.50	19.3	48.50	20.4	90.50	20.5
7.00	19.4	49.00	20.4	91.00	20.5
7.50	19.4	49.50	20.4	91.50	20.5
8.00	19.5	50.00	20.5	92.00	20.5
8.50	19.5	50.50	20.4	92.50	20.5
9.00	19.5	51.00	20.4	93.00	20.4
9.50	19.5	51.50	20.4	93.50	20.5
10.00	19.5	52.00	20.4	94.00	20.6
10.50	19.7	52.50	20.4	94.50	20.5
11.00	19.6	53.00	20.4	95.00	20.5
11.50	19.6	53.50	20.4	95.50	20.5
12.00	19.6	54.00	20.4	96.00	20.5
12.50	19.8	54.50	20.4	96.50	20.5
13.00	19.8	55.00	20.4	97.00	20.5
13.50	19.8	55.50	20.4	97.50	20.5
14.00	19.8	56.00	20.3	98.00	20.5
14.50	19.8	56.50	20.4	98.50	20.5
15.00	19.9	57.00	20.5	99.00	20.5
15.50	19.8	57.50	20.4	99.50	20.5
16.00	19.9	58.00	20.4	100.00	20.5
16.50	19.9	58.50	20.4	100.50	20.5
17.00	19.9	59.00	20.4	101.00	20.4
17.50	19.9	59.50	20.4	101.50	20.5
18.00	20	60.00	20.4	102.00	20.5
18.50	19.9	60.50	20.3	102.50	20.5
19.00	20	61.00	20.4	103.00	20.5
19.50	20	61.50	20.5	103.50	20.5



20.00	20	62.00	20.4	104.00	20.5
20.50	20	62.50	20.5	104.50	20.5
21.00	20	63.00	20.4	105.00	20.5
21.50	20.1	63.50	20.4	105.50	20.5
22.00	20.1	64.00	20.4	106.00	20.5
22.50	20.1	64.50	20.4	106.50	20.5
23.00	20	65.00	20.4	107.00	20.5
23.50	20.2	65.50	20.4	107.50	20.5
24.00	20	66.00	20.4	108.00	20.5
24.50	20.1	66.50	20.4	108.50	20.6
25.00	20.2	67.00	20.5	109.00	20.5
25.50	20.2	67.50	20.4	109.50	20.5
26.00	20.2	68.00	20.4	110.00	20.5
26.50	20.1	68.50	20.4	110.50	20.5
27.00	20.2	69.00	20.5	111.00	20.5
27.50	20.2	69.50	20.5	111.50	20.5
28.00	20.2	70.00	20.4	112.00	20.5
28.50	20.3	70.50	20.4	112.50	20.5
29.00	20.2	71.00	20.5	113.00	20.5
29.50	20.2	71.50	20.4	113.50	20.5
30.00	20.2	72.00	20.4	114.00	20.5
30.50	20.3	72.50	20.5	114.50	20.5
31.00	20.2	73.00	20.4	115.00	20.5
31.50	20.3	73.50	20.5	115.50	20.6
32.00	20.3	74.00	20.5	116.00	20.5
32.50	20.2	74.50	20.5	116.50	20.5
33.00	20.3	75.00	20.4	117.00	20.5
33.50	20.3	75.50	20.4	117.50	20.5
34.00	20.3	76.00	20.5	118.00	20.5
34.50	20.3	76.50	20.5	118.54	20.5
35.00	20.3	77.00	20.5	119.04	20.4
35.50	20.3	77.50	20.5	119.54	20.5
36.00	20.3	78.00	20.4	120.04	20.6
36.50	20.4	78.50	20.4	120.54	20.5
37.00	20.4	79.00	20.5	121.04	20.5
37.50	20.3	79.50	20.4	121.54	20.5
38.00	20.3	80.00	20.4	122.04	20.5
38.50	20.3	80.50	20.4	122.54	20.6
39.00	20.4	81.00	20.5	123.04	20.6
39.50	20.4	81.50	20.4	123.54	20.6
40.00	20.4	82.00	20.5	124.04	20.6
40.50	20.3	82.50	20.5	124.54	20.6
41.00	20.4	83.00	20.5	125.04	20.6
41.50	20.3	83.50	20.4	125.54	20.5
42.00	20.4	84.00	20.4	126.04	20.6

Sensor LDR

El tiempo representa segundos y el valor es relativo de 0-1023.

Tiempo	Valor	Tiempo	Valor	Tiempo	Valor	Tiempo	Valor	Tiempo	Valor	Tiempo	Valor
1	730	51	596	101	784	151	713	201	645	251	780
2	589	52	728	102	784	152	735	202	679	252	638
3	639	53	753	103	787	153	766	203	666	253	596
4	661	54	784	104	787	154	779	204	701	254	604
5	743	55	784	105	786	155	781	205	686	255	608
6	785	56	788	106	788	156	783	206	722	256	653
7	790	57	787	107	787	157	782	207	699	257	651
8	788	58	787	108	786	158	752	208	730	258	645
9	787	59	787	109	787	159	720	209	698	259	681
10	764	60	786	110	785	160	591	210	667	260	663
11	723	61	771	111	787	161	597	211	683	261	689
12	608	62	780	112	784	162	599	212	648	262	663
13	612	63	721	113	787	163	632	213	657	263	681
14	665	64	732	114	786	164	624	214	622	264	648
15	677	65	687	115	786	165	654	215	629	265	615
16	748	66	649	116	786	166	574	216	595	266	623
17	772	67	656	117	785	167	662	217	604	267	589
18	787	68	618	118	786	168	545	218	581	268	594
19	789	69	622	119	783	169	513	219	772	269	591
20	790	70	584	120	784	170	637	220	771	270	570
21	786	71	584	121	786	171	610	221	788	271	765
22	785	72	732	122	783	172	620	222	788	272	757
23	748	73	781	123	785	173	595	223	789	273	784
24	722	74	782	124	783	174	606	224	789	274	790
25	673	75	787	125	785	175	584	225	784	275	789
26	601	76	787	126	783	176	598	226	785	276	789
27	607	77	788	127	779	177	579	227	784	277	790
28	656	78	788	128	782	178	709	228	761	278	787
29	662	79	786	129	785	179	577	229	777	279	789
30	718	80	788	130	785	180	674	230	725	280	786
31	722	81	786	131	713	181	586	231	748	281	783
32	786	82	786	132	750	182	588	232	706	282	787
33	785	83	788	133	775	183	596	233	675	283	784
34	783	84	787	134	759	184	585	234	699	284	788
35	787	85	786	135	756	185	574	235	675	285	785
36	788	86	786	136	689	186	594	236	706	286	788
37	788	87	776	137	644	187	584	237	689	287	787
38	787	88	775	138	645	188	611	238	733	288	789
39	788	89	775	139	611	189	601	239	723	289	787
40	788	90	653	140	619	190	632	240	784	290	785
41	719	91	641	141	592	191	621	241	783	291	787
42	693	92	596	142	608	192	653	242	784	292	785
43	618	93	598	143	591	193	639	243	782	293	788
44	586	94	643	144	607	194	623	244	783	294	785
45	779	95	647	145	591	195	649	245	789	295	787
46	787	96	701	146	579	196	632	246	788	296	785
47	787	97	707	147	607	197	659	247	789	297	782
48	787	98	714	148	604	198	643	248	789	298	784
49	685	99	784	149	644	199	674	249	789	299	782
50	614	100	785	150	650	200	658	250	780	300	784

Tiempo	Valor	Tiempo	Valor	Tiempo	Valor	Tiempo	Valor	Tiempo	Valor	Tiempo	Valor
301	782	351	781	401	702	451	780	501	779	551	583
302	784	352	786	402	715	452	780	502	781	552	563
303	782	353	785	403	782	453	780	503	779	553	682
304	787	354	784	404	780	454	760	504	781	554	560
305	786	355	789	405	783	455	773	505	750	555	723
306	785	356	789	406	784	456	715	506	782	556	597
307	789	357	785	407	787	457	675	507	762	557	752
308	789	358	785	408	787	458	690	508	781	558	698
309	788	359	747	409	786	459	652	509	781	559	773
310	788	360	737	410	764	460	662	510	778	560	759
311	782	361	720	411	765	461	623	511	778	561	783
312	785	362	585	412	562	462	625	512	779	562	787
313	787	363	590	413	563	463	584	513	779	563	787
314	779	364	636	414	598	464	581	514	780	564	780
315	784	365	641	415	599	465	721	515	786	565	780
316	763	366	693	416	644	466	783	516	787	566	780
317	777	367	696	417	648	467	784	517	781	567	781
318	732	368	768	418	651	468	787	518	780	568	711
319	766	369	774	419	706	469	787	519	688	569	645
320	670	370	780	420	708	470	779	520	685	570	634
321	756	371	780	421	779	471	779	521	692	571	584
322	779	372	781	422	779	472	779	522	579	572	577
323	756	373	788	423	778	473	738	523	577	573	735
324	780	374	788	424	778	474	737	524	616	574	733
325	758	375	767	425	778	475	678	525	614	575	782
326	780	376	738	426	782	476	682	526	655	576	780
327	755	377	668	427	782	477	638	527	647	577	787
328	780	378	596	428	787	478	644	528	686	578	786
329	786	379	606	429	787	479	607	529	671	579	787
330	781	380	661	430	788	480	614	530	653	580	783
331	787	381	671	431	789	481	580	531	681	581	785
332	785	382	743	432	785	482	641	532	657	582	780
333	789	383	761	433	787	483	584	533	682	583	783
334	788	384	779	434	788	484	768	534	655	584	779
335	788	385	779	435	785	485	760	535	677	585	777
336	789	386	779	436	788	486	784	536	649	586	779
337	787	387	786	437	786	487	782	537	623	587	777
338	783	388	786	438	787	488	787	538	641	588	780
339	786	389	787	439	787	489	784	539	615	589	777
340	782	390	787	440	779	490	785	540	631	590	780
341	785	391	774	441	764	491	780	541	604	591	778
342	781	392	775	442	719	492	782	542	619	592	782
343	783	393	777	443	636	493	778	543	593	593	778
344	780	394	646	444	613	494	780	544	610	594	776
345	782	395	664	445	586	495	779	545	587	595	778
346	780	396	586	446	712	496	778	546	567	596	776
347	782	397	588	447	784	497	779	547	585	597	777
348	780	398	631	448	785	498	781	548	566	598	776
349	780	399	636	449	786	499	779	549	584	599	776
350	782	400	691	450	780	500	780	550	565	600	777

Tiempo	Valor	Tiempo	Valor	Tiempo	Valor	Tiempo	Valor	Tiempo	Valor	Tiempo	Valor
601	780	651	684	701	668	751	653	801	781	851	577
602	777	652	694	702	573	752	676	802	777	852	566
603	780	653	652	703	566	753	651	803	781	853	595
604	777	654	663	704	600	754	629	804	778	854	587
605	773	655	627	705	599	755	656	805	782	855	621
606	780	656	640	706	600	756	638	806	781	856	612
607	758	657	611	707	649	757	671	807	786	857	602
608	780	658	587	708	660	758	660	808	787	858	632
609	752	659	606	709	734	759	701	809	786	859	616
610	719	660	587	710	764	760	690	810	779	860	639
611	770	661	612	711	777	761	677	811	783	861	612
612	748	662	598	712	778	762	722	812	776	862	625
613	778	663	627	713	780	763	705	813	786	863	590
614	779	664	615	714	787	764	757	814	786	864	594
615	777	665	605	715	786	765	731	815	781	865	566
616	777	666	640	716	764	766	778	816	778	866	773
617	777	667	632	717	754	767	757	817	778	867	775
618	783	668	676	718	568	768	778	818	669	868	787
619	783	669	674	719	569	769	772	819	632	869	787
620	788	670	735	720	609	770	743	820	561	870	780
621	788	671	735	721	609	771	779	821	733	871	778
622	778	672	778	722	608	772	771	822	787	872	776
623	779	673	778	723	653	773	776	823	785	873	723
624	686	674	777	724	653	774	779	824	776	874	709
625	715	675	778	725	707	775	775	825	773	875	647
626	735	676	778	726	708	776	775	826	756	876	643
627	567	677	785	727	779	777	776	827	678	877	598
628	562	678	785	728	779	778	781	828	671	878	599
629	593	679	786	729	778	779	784	829	618	879	561
630	585	680	787	730	776	780	777	830	613	880	564
631	616	681	786	731	776	781	702	831	566	881	740
632	604	682	770	732	779	782	616	832	559	882	781
633	588	683	773	733	778	783	666	833	772	883	778
634	609	684	625	734	783	784	779	834	786	884	786
635	584	685	698	735	781	785	778	835	786	885	786
636	597	686	570	736	785	786	785	836	778	886	784
637	567	687	562	737	782	787	763	837	777	887	785
638	574	688	581	738	779	788	633	838	779	888	779
639	695	689	567	739	783	789	598	839	780	889	776
640	655	690	594	740	777	790	598	840	707	890	776
641	776	691	573	741	779	791	631	841	653	891	770
642	788	692	572	742	775	792	609	842	656	892	768
643	787	693	573	743	776	793	579	843	616	893	693
644	784	694	599	744	779	794	583	844	623	894	693
645	784	695	569	745	732	795	670	845	592	895	643
646	778	696	626	746	743	796	707	846	604	896	645
647	778	697	751	747	690	797	782	847	579	897	606
648	778	698	620	748	704	798	783	848	594	898	573
649	733	699	740	749	665	799	786	849	573	899	580
650	739	700	561	750	683	800	787	850	567	900	702

Tiempo	Valor	Tiempo	Valor	Tiempo	Valor
901	643	930	248	959	139
902	771	931	259	960	134
903	761	932	254	961	122
904	785	933	266	962	81
905	786	934	265	963	42
906	786	935	269	964	6
907	781	936	270	965	1
908	782	937	273	966	1
909	775	938	272	967	0
910	775	939	266	968	9
911	777	940	270	969	4
912	777	941	247	970	1
913	719	942	238	971	0
914	662	943	241	972	0
915	662	944	251	973	2
916	619	945	247	974	2
917	623	946	240	975	2
918	586	947	225	976	1
919	590	948	235	977	1
920	563	949	256	978	1
921	758	950	254	979	1
922	744	951	272	980	1
923	780	952	271	981	1
924	777	953	263	982	1
925	785	954	257	983	0
926	784	955	266	984	1
927	273	956	135	985	2
928	268	957	133	986	6
929	262	958	134	987	10

## 14 - Bibliografía

Resh, H. M. (2013). Hydroponic Food Production. <https://doi.org/10.1201/9781003133254>

Jensen, M. H. (1997). Hydroponics. *HortScience*, 32(6), 1018-1021. <https://doi.org/10.21273/hortsci.32.6.1018>

Savvas, D., y Gruda, N. (2018). Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry – A review. *European Journal of Horticultural Science*, 83(5), 280-293. <https://doi.org/10.17660/ejhs.2018/83.5.2>

Urrestarazu, M. (2013). *III International Symposium on Soilless Culture and Hydroponics: Innovation and Advanced Technology for Circular Horticulture | International Society for Horticultural Science*. <https://www.ishs.org/symposium/711>

Eyssartier, C., Ladio, A., y Lozada, A. (2009). Uso de plantas medicinales cultivadas en una comunidad semi-rural de la estepa patagónica. *Bol Latinoam Caribe Plant Med Aromat* 8(2):77 – 85.

DIN SPEC 91345. (2016). Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0). Berlin: Beuth Verlag GmbH. <https://www.dinmedia.de/en/technical-rule/din-spec-91345/250940128>.

DIN EN 62264-1. (2013). Enterprise-control system integration - Part 1: Models and terminology (IEC 62264-1:2013). Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN EN 61512-1. (2011). Batch control - Part 1: Models and terminology (IEC 61512-1:2011). Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Aicardi A. (2022), "Hidroponía 4.0: un Mapeo Sistemático de la Literatura".

Mattei, A., Orué, M., Caliusco, Ma. Laura (2023). Laboratorio Autocontenido Hidropónico 4.0. CAIM/CAIFE. Santa Fe (Argentina)

Srivastava, K., Singh, S., Singh, A., Jain, T., Datta, R., y Kohli, A. (2023). Effect of Temperature (Cold and Hot) Stress on Medicinal Plants. En *Medicinal Plants* (pp. 153-168). [https://doi.org/10.1007/978-981-19-5611-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-19-5611-9_5)

Castroverde, C. D. M., & Dina, D. (2021). Temperature regulation of plant hormone signaling during stress and development. *Journal Of Experimental Botany*. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab257>

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna* (5.a ed.). Pearson Educación.

Rasheed, O., y Kvamsdal T. (2020). "Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective," in IEEE Access, vol. 8, pp. 21980-22012, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>.

Mihai, S., Yaqoob, M., Hung, D., Davis, W., Towakel, P., Raza, M., Karamanoğlu, M., Barn, B., Shetve, D., Prasad, R., Venkataraman, H., Trestian, R., y Nguyen, H. (2022). Digital Twins: A Survey on Enabling Technologies, Challenges, Trends and Future Prospects. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 24, 2255-2291. <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3208773>

Kober, C., Fette, M., y Wulfsberg, J. (2022). Challenges of Digital Twin Application in Manufacturing. 2022 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 0162-0168. <https://doi.org/10.1109/IEEM55944.2022.9989654>.

Fuller, A., Fan, Z., y Day, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. IEEE Access, 8, 108952-108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>.

Shahzad, M., Shafiq, M., Douglas, D., y Kassem, M. (2022). Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and Challenges. Buildings. <https://doi.org/10.3390/buildings12020120>.

Broo, D., y Schooling, J. (2021). Digital twins in infrastructure: definitions, current practices, challenges and strategies. International Journal of Construction Management, 23, 1254 - 1263. <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1966980>.

Wright, L., y Davidson, S. (2020). How to tell the difference between a model and a digital twin. Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences, 7. <https://doi.org/10.1186/s40323-020-00147-4>.

Arin, I., Murad, D., Hendric, H., y Warnars, S. (2023). A Systematic Literature Review of Recent Trends and Challenges in Digital Twin Implementation. 2023 10th International Conference on ICT for Smart Society (ICISS), 1-10. <https://doi.org/10.1109/ICISS59129.2023.10291219>.

Adjei, P., y Montasari, R. (2020). A Critical Overview of Digital Twins, 51-61. <https://doi.org/10.4018/ijose.2020010104>.

Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., y Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>.

Plattform Industrie 4.0 & ECLASS. (2021). Modelling the semantics of data of an asset administration shell with elements of ECLASS [White paper]. Plattform Industrie 4.0 & ECLASS.

Eclipse AASX Package Explorer (n.d.). GitHub. <https://github.com/eclipse-aaspe/package-explorer> (Consultado el 05/05/2024).