



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA DE MECATRÓNICA**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE LISÍMETROS PARA MACETAS EN  
LA ESTACIÓN DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN DE CIENCIAS DE LA  
VIDA Y DESARROLLO SOSTENIBLE**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero e Ingeniera en Mecatrónica

**AUTORES: JOSÉ LUIS GRANJA GAVIDIA**

**CARLA STEFANIA QUELAL MONTENEGRO**

**TUTORA: CARMEN JOHANNA CELI SÁNCHEZ**

Quito – Ecuador

2026

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUDITORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, José Luis Granja Gavidia con documento de identificación N° 1750136366 y Carla Stefania Quelal Montenegro con documento de identificación N° 0450157714; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 03 de marzo de 2026

Atentamente,



José Luis Granja Gavidia

1750136366



Carla Stefania Quelal Montenegro

0450157714

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, José Luis Granja Gavidia con documento de identificación N° 1750136366 y Carla Stefania Quelal Montenegro con documento de identificación N° 0450157714, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Dispositivo Tecnológico: “Implementación de un sistema de lisímetros para macetas en la Estación de Investigación e Innovación de Ciencias de la Vida y Desarrollo Sostenible”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero e Ingeniera en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 03 marzo de 2026

Atentamente,



José Luis Granja Gavidia

1750136366



Carla Stefania Quelal Montenegro

0450157714

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carmen Johanna Celi Sánchez con documento de identificación N° 1717437808, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi auditoria fue desarrollado el trabajo de titulación: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE LISÍMETROS PARA MACETAS EN LA ESTACIÓN DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DESARROLLO SOSTENIBLE, realizado por José Luis Granja Gavidia con documento de identificación N° 1750136366 y Carla Stefania Quelal Montenegro con documento de identificación N° 0450157714, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Dispositivo Tecnológico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 03 de marzo de 2026

Atentamente,



Ing. Carmen Johanna Celi Sánchez, MSc

1717437808

## AGRADECIMIENTO

Mi más profundo agradecimiento a mi padre, Juan Quelal, por su apoyo incondicional, su sacrificio y por ser el pilar fundamental en el cumplimiento de este sueño. A mi madre, Erika Montenegro; a mis hermanas Jhoanna Quelal, Karolina Quelal y Kamila Tulcán; a mi hermano Mateo Tulcán; y a mi sobrina Romina Patiño, por su cariño y respaldo constante a lo largo de este camino.

De manera muy especial, a mi hijo Darwin Quelal, quien ha sido mi mayor motivación y la razón que me impulsó a superarme cada día. Su amor y su presencia dieron sentido a cada esfuerzo realizado y me recordaron siempre por qué valía la pena continuar.

A Doña Blanca, Kenneth y Mishel, por su apoyo sincero y generoso durante este proceso. A mis amigos de la universidad, gracias por su compañerismo y apoyo incondicional en cada etapa.

Finalmente, mi sincero agradecimiento a la Ing. Johanna Celi, por su guía, paciencia y apoyo durante el desarrollo de este trabajo, y a todos los docentes que contribuyeron a mi aprendizaje y formación profesional, por compartir sus conocimientos y experiencia a lo largo de mi carrera.

Carla Stefania Quelal Montenegro

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de formarme académica y profesionalmente.

A mis docentes, quienes a lo largo de la carrera compartieron sus conocimientos, experiencias y valores, contribuyendo significativamente a mi desarrollo como futuro ingeniero.

De manera especial, agradezco a mi tutor de tesis por su guía, paciencia y apoyo durante la elaboración del presente trabajo, así como por sus valiosas observaciones que permitieron mejorar la calidad de esta investigación.

A mis compañeros y amigos, quienes hicieron de esta etapa universitaria una experiencia enriquecedora, brindándome su ayuda, motivación y compañía en cada desafío académico.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra forma, colaboraron y aportaron para la culminación exitosa de este proyecto de titulación.

José Luis Granja Gavidia

## DEDICATORIA

Dedico este logro a mis padres, Juan Quelal y Erika Montenegro, y a mi familia, quienes han sido mi mayor apoyo y el ejemplo constante que guía cada uno de mis pasos; en su amor y esfuerzo encontré la fuerza necesaria para llegar hasta aquí.

A mi hijo Darwin Quelal, quien le dio un nuevo significado a mis metas y transformó cada desafío en una razón para avanzar con mayor determinación. Y a mí misma, por atreverme a creer que podía lograrlo, por superar mis propias expectativas y demostrarme que con esfuerzo, constancia y amor todo es posible.

Carla Stefania Quelal Montenegro

Dedico el presente trabajo de titulación principalmente a Dios, por brindarme salud, fortaleza y sabiduría durante todo este proceso académico, permitiéndome culminar una de las etapas más importantes de mi vida profesional.

A mis padres, quienes con su amor, esfuerzo y sacrificio han sido el pilar fundamental en mi formación personal y académica. Gracias por su apoyo incondicional, sus consejos y por enseñarme el valor de la perseverancia y la responsabilidad.

A mi familia, por su constante motivación y por acompañarme en los momentos difíciles, recordándome siempre que con dedicación y disciplina todo objetivo es alcanzable.

Finalmente, dedico este trabajo a mí mismo, por no rendirme ante las adversidades y por mantener siempre el compromiso de superación personal y profesional.

José Luis Granja Gavidia

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUDITORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	II
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA .....	III
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	IV
AGRADECIMIENTO .....	V
DEDICATORIA.....	VI
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS .....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
RESUMEN .....	XIV
ABSTRACT.....	XV
INTRODUCCIÓN .....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
JUSTIFICACIÓN .....	4
OBJETIVOS .....	6
OBJETIVO GENERAL.....	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
CAPÍTULO I .....	7
MARCO CONTEXTUAL Y TEÓRICO .....	7
1.1 Lisímetros y su aplicación en la agricultura moderna .....	7
1.1.1 Tipos de lisímetros y sus funciones .....	8
1.1.2 Funcionamiento de los lisímetros de pesaje .....	8
1.1.3 Lisímetros de Drenaje.....	9
1.2 Análisis de los lisímetros de drenaje y de pesada aplicados a la gestión del riego agrícola .....	10

1.2.1	Importancia de los Lisímetros en la Gestión de Riego .....	11
1.2.2	Evaluación técnica para la construcción del sistema .....	12
1.3	Lisímetros de Pesaje en Sistema de Riego.....	12
1.3.1	Principio de Funcionamiento .....	12
1.3.2	Ventajas para Control Hídrico .....	13
1.3.3	Aplicación de tecnologías de precisión en el monitoreo hídrico .....	13
1.4	Control de la humedad en el sustrato .....	13
1.4.1	Relevancia en el manejo de cultivos.....	13
1.4.2	Relación con el desarrollo vegetal .....	14
1.4.3	Rangos óptimos .....	14
1.5	Sensores Aplicados a la Medición Hídrica .....	14
1.5.1	Sensores de Humedad.....	14
1.5.2	Sensores de Peso (celdas de carga).....	14
1.6	Sistemas DAQ para adquisición de datos .....	15
1.6.1	Función .....	15
1.6.2	Conexión y sincronización de sensores .....	15
1.6.3	Ventajas de la automatización en el riego .....	15
1.7	Herramientas tecnológicas en la gestión de riego .....	15
1.7.1	Integración de sistemas inteligentes .....	15
1.7.2	Automatización .....	16
1.7.3	Enfoque de Implementación .....	16
1.8	Comportamiento de la humedad del sustrato y su influencia en el desarrollo vegetal.....	16
1.9	Simulación y modelado del comportamiento hídrico .....	17
CAPÍTULO II.....		19
ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS .....		19
2.1	Alternativa implementada para el sistema de lisímetro .....	19

2.2 Análisis de la configuración de celdas de carga de 150 kg .....	19
2.3 Análisis de Sensor SIWAREX WL260 SP-S SA.....	20
2.4 Evaluación de la Celda de Carga para la Medición del Agua Rechazada .....	20
2.5 Evaluación del Sensor para Monitoreo de Humedad del Suelo .....	21
2.6 Evaluación del Controlador Lógico Programable .....	22
2.7 Evaluación de la Fuente de Alimentación .....	22
2.8 Selección de la Válvula de Control de Riego .....	22
2.9 Evaluación Sensor Nivel de Agua .....	23
2.10 Selección y propiedades del material estructural .....	23
2.11 Resumen de la Alternativa Ganadora .....	24
CAPÍTULO III.....	26
DISEÑO Y ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN .....	26
3.1 Representación del flujo operativo del lisímetro de pesaje .....	26
3.2 Presentación del sistema propuesto .....	28
3.3 Funcionamiento del sistema .....	29
3.3.1 Supervisión del Pesaje y Parámetros del Suelo .....	29
3.3.2 Control Optimo del Riego .....	29
3.3.3 Transmisión y Procesamiento de Datos .....	30
3.4 Estructura general del lisímetro .....	30
3.4.1 Diagrama P&ID del sistema del sistema de lisimetría .....	31
3.5 Esquema estructural del sistema de pesaje por lisímetro .....	33
3.5.1 Análisis Estructural .....	35
3.5.2 Análisis Estructural a través de Métodos de Simulación.....	43
3.6 Análisis Comparativo .....	47
CAPÍTULO IV.....	49
PRUEBAS Y RESULTADOS.....	49
4.1 Lectura e Instrumentación de Datos .....	49

4.1.1 Sensor de Humedad .....	49
4.1.2 Sensor de Peso .....	50
4.1.3 Sensor de Flotabilidad .....	51
4.2 Diseño del Dashboard y Obtención de Datos de LogoSoft .....	52
4.2.1 Obtención de Datos de LogoSoft.....	52
4.2.2 Diagrama de Funciones .....	54
4.3 Evidencia de Variables Configuradas en el Dashboard .....	57
4.4 Análisis de Datos del Archivo CSV .....	58
4.5 Decisión Final Para Construcción Del Trípode Lisímetros .....	58
4.6 Evidencia de la Implementación de la Planta .....	59
4.7 Normativa Para el Diseño del tablero de Control.....	61
Conclusiones y Recomendaciones .....	62
Conclusiones .....	62
Recomendaciones .....	64
Referencias.....	65
ANEXOS .....	68

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Lisímetro de drenaje vs. Lisímetro de pesada .....	11
<b>Tabla 2.</b> Elementos clave de la alternativa ganadora del sistema de lisímetro .....	25
<b>Tabla 3.</b> Elementos principales del lisímetro y su descripción funcional .....	31
<b>Tabla 4.</b> Elementos que conforman el diagrama P&ID.....	33
<b>Tabla 5.</b> Análisis matemático comparativo de parte de simulación vs real .....	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ejemplo real de un lisímetro de pesaje con sistema de medición mediante galgas extensiométricas [4].	8
<b>Figura 2.</b> Esquema de un lisímetro de drenaje empleado para el balance hídrico del suelo [6].	10
<b>Figura 3.</b> Sensor SP4M [26].	21
<b>Figura 4.</b> Sensor capacitivo de humedad del suelo versión 1.2 [27].	21
<b>Figura 5.</b> PLC Siemens LOGO [29].	22
<b>Figura 6.</b> Válvula solenoide implementada [31].	23
<b>Figura 7.</b> Sensor de nivel de agua [32].	23
<b>Figura 8.</b> Diagrama de flujo del sistema de lisímetros	27
<b>Figura 9.</b> Representación simulada del lisímetro de pesaje	34
<b>Figura 10.</b> Estructura de acero del lisímetro en SolidWorks.	38
<b>Figura 11.</b> Plano dimensional del tubo cuadrado utilizado en la estructura	39
<b>Figura 12 .</b> Representación isométrica del plato cónico	40
<b>Figura 13.</b> Vista isométrica de la almohadilla.	40
<b>Figura 14.</b> Vista isométrica del gabinete eléctrico	41
<b>Figura 15.</b> Estructura caja eléctrica.	42
<b>Figura 16.</b> Plano de conjunto	42
<b>Figura 17.</b> Análisis de tensión máxima.	43
<b>Figura 18.</b> Cálculo de factor de seguridad	44
<b>Figura 19.</b> Análisis de Deformación	46
<b>Figura 20.</b> Esquemático de diagrama de conexiones.	48
<b>Figura 21.</b> Instrumentación Sensor de Humedad	49
<b>Figura 22.</b> Intrumentación post medida	50
<b>Figura 23.</b> Medición Sensor de Peso	50
<b>Figura 24.</b> Instrumentación Sensor de Peso.	51
<b>Figura 25.</b> Funcionamiento Etapa de Drenado	52
<b>Figura 26.</b> Nodo de Funciones	53
<b>Figura 27.</b> Nodo de procesamiento de funciones	53
<b>Figura 28.</b> Diagrama de Funciones Node-Red.	54

<b>Figura 29.</b> Ecuaciones de Proceso de Datos .....	54
<b>Figura 30.</b> Procesamiento de los Datos.....	55
<b>Figura 31.</b> Payload a CSV.....	56
<b>Figura 32.</b> Configuración CSV .....	56
<b>Figura 33.</b> Escritura CSV dentro del PC.....	57
<b>Figura 34.</b> Variables en el Dashboard .....	57
<b>Figura 35.</b> Datos Exportados de Node-Red .....	58
<b>Figura 36.</b> Ejecución del Proceso .....	59
<b>Figura 37.</b> Planta Implementada .....	60
<b>Figura 38.</b> Tablero de Control Planta.....	60
<b>Figura 39.</b> Esquema de distribución eléctrica.....	61

## RESUMEN

En la actualidad, el manejo adecuado de recurso hídrico se ha convertido en un reto cada vez más importante, principalmente por el alto consumo que generan los sistemas de riego tradicionales y por alta disponibilidad de agua en varias zonas productivas. En muchos casos, el riego se realiza sin contar con datos exactos sobre cuánto necesita realmente el cultivo, lo que provoca un uso poco eficiente del agua. Frente a esta situación, este proyecto tuvo como objetivo la implementación de un sistema experimental para medir el consumo hídrico utilizando lisímetros en macetas. El sistema fue realizado para ser implementado en la Estación de Investigación e Innovación de Ciencias de la Vida y Desarrollo Sostenible, con la finalidad de monitorear el uso del agua en condiciones controladas.

El sistema implementado está compuesto por una estructura mecánica que sirve como soporte para las macetas de cultivo. Además, se integraron distintos sensores y dispositivos electrónicos encargados de realizar las mediciones, asegurando que las señales obtenidas sean confiables, para la gestión y el control del sistema se utilizó un PLC de la familia Siemens LOGO!, el cual se encargó de procesar tanto señales analógicas como digitales provenientes de las celdas de carga, el sensor de humedad del suelo y los otros sensores auxiliares del sistema hidráulico. Debido al uso de sensores no industriales, cuyos niveles de voltaje no correspondieron a los rangos nominales de entrada del PLC, se implementó un modelo matemático de escalamiento y un acondicionamiento de señal mediante amplificadores de instrumentación.

El intercambio de información entre el PLC y el entorno de supervisión se estableció mediante el protocolo TCP/IP, utilizando una conexión Ethernet, lo que permitió la transmisión continua de datos hacia un entorno de visualización implementado en Node-RED. Para la validación del sistema, se realizaron pruebas experimentales con macetas reales evidenciando que, aunque los sensores empleados presentaron un margen de error aproximado de 24%, las técnicas de escalamiento y acondicionamiento implementadas mejoraron la estabilidad y repetibilidad de las mediciones. De manera general, el sistema desarrollado representó una alternativa operativa y adaptable para el seguimiento hídrico en estudios de innovación agraria.

- *Palabras claves:* industria 4.0, lisímetro, PLC, monitoreo hídrico, agricultura tecnificada.

## ABSTRACT

Nowadays, proper water resource management has become an increasingly important challenge, mainly due to the high water consumption associated with traditional irrigation systems and the limited availability of water in many productive areas. In many cases, irrigation is carried out without accurate information about the actual water needs of the crop, which results in inefficient use of this resource. In response to this issue, this project aimed to implement an experimental system to measure water consumption using lysimeters in pots. The system was developed to be installed at the Research and Innovation Station of Life Sciences and Sustainable Development, with the purpose of monitoring water use under controlled conditions.

The implemented system consists of a mechanical structure that serves as support for the crop pots. In addition, several sensors and electronic devices were integrated to carry out the measurements, ensuring that the acquired signals are reliable. For system management and control, a Siemens LOGO! PLC was used, which processes both analog and digital signals coming from the load cells, the soil moisture sensor, and other auxiliary sensors of the hydraulic system. Due to the use of non-industrial sensors whose voltage levels did not match the nominal PLC input ranges, a mathematical scaling model and signal conditioning using instrumentation amplifiers were implemented.

Communication between the PLC and the monitoring system was established through the TCP/IP protocol using a wired Ethernet connection, allowing continuous data transmission to a visualization platform developed in Node-RED. Experimental tests were conducted using real pots to validate system performance. The results showed that, although the sensors presented an approximate error of 24%, the implemented scaling and conditioning techniques improved measurement stability and repeatability. In conclusion, the developed system represented a functional and scalable solution for water monitoring in agricultural research applications.

- *Key words:* industry 4.0, lysimeter, PLC, water monitoring, technified agriculture.

## INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad de los sistemas agrícolas depende en gran medida del manejo responsable del recurso hídrico, debido a que la agricultura representa uno de los principales sectores consumidores de agua a nivel global. El crecimiento de la actividad agrícola, junto con la aplicación de métodos de riego tradicionales ha incrementado la presión sobre las fuentes de agua, especialmente en regiones donde su disponibilidad es limitada. En muchos sistemas productivos, el riego se realiza sin contar con datos confiables sobre los requerimientos hídricos reales del cultivo lo que genera un desperdicio del recurso, disminución de la eficiencia hídrica y aumento de los costos de producción. Frente a este escenario, la agricultura de precisión ha incorporado tecnologías orientadas al monitoreo y control de riego permitiendo mejorar la gestión del recurso hídrico a través de sensores y herramientas de medición especializadas [1].

Dentro de estas tecnologías, los lisímetros han adquirido relevancia como herramientas que permiten analizar la dinámica hídrica entre el suelo, el cultivo y el ambiente, ya que facilitan la medición directa de variables como la evapotranspiración y el consumo real del agua por parte del cultivo. La información obtenida a partir de estos dispositivos ayuda a organizar mejor la planificación de riego, ya que permite conocer con mayor claridad cuánto agua está consumiendo realmente el cultivo. Gracias a esto, se pueden evitar aplicaciones innecesarias y utilizar el recurso hídrico de una forma más eficiente. Investigaciones recientes evidencian que la integración de lisímetros pesada con sensores junto con el sistema de adquisición de datos permite obtener mediciones continuas confiables, así como estimar coeficientes de cultivo con mayor precisión, fortaleciendo la toma de decisiones técnicas en el manejo del riego agrícola [2].

En este contexto, el desarrollo y análisis de soluciones tecnológicas basadas en instrumentos de medición hídrica constituye una opción técnicamente factible para abordar las problemáticas actuales asociadas al uso ineficiente del agua en la agricultura, promoviendo prácticas productivas más sostenibles y tecnológicamente eficientes.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El uso intensivo de agua en la agricultura ha generado una creciente preocupación a nivel mundial, ya que la agricultura continúa siendo uno de los mayores consumidores del recurso hídrico. Su demanda ha incrementado debido a la ampliación de las superficies cultivadas junto con la aplicación de métodos de riego que no siempre garantizan un aprovechamiento adecuado del agua disponible. En muchos sistemas agrícolas, el riego se realiza sin un control preciso de las necesidades reales del cultivo, lo que ocasiona un suministro excesivo o deficiente del agua. Esa falta de regulación tiene su origen en la ausencia de herramientas prácticas que permitan monitorear de manera continua el volumen de agua que se incorpora al sustrato y la fracción que es realmente aprovechada por las plantas [3]. Como consecuencia, una parte importante del recurso se desperdicia, afectando no sólo la disponibilidad del agua para otros usos, sino también la sostenibilidad ambiental de las zonas agrícolas.

La problemática se intensifica en explotaciones de gran extensión, donde el seguimiento manual de las condiciones del suelo se vuelve impreciso y difícil de ejecutar. Esta situación provoca pérdidas de eficiencia del riego, disminución del rendimiento agrícola y un aumento en la demanda hídrica, lo cual repercute en los costos operativos de los productores. Investigaciones recientes evidencian que la aplicación de tecnologías basadas en sensores de humedad y sistemas automatizados de riego permite mejorar notablemente el uso del agua, reduciendo su consumo sin comprometer la productividad agrícola [1]. Sin embargo, la mayoría de los agricultores no dispone de herramientas económicas y adaptadas a su contexto que permitan medir de manera precisa el balance hídrico del cultivo.

Además del impacto ambiental, la ineficiencia en el manejo del riego acarrea consecuencias económicas importantes. Un estudio realizado en Túnez estimó que las pérdidas anuales generadas por un uso inadecuado del agua alcanzan cifras considerablemente altas debido al exceso de riego, la disminución del rendimiento agrícola y el incremento del consumo energético asociado a la operación de los sistemas de riego [3]. Lo anterior evidencia que la falta de control en el suministro del agua no sólo limita a la sostenibilidad del recurso, sino que también compromete a la rentabilidad agrícola especialmente en regiones donde el agua representa un recurso escaso o costoso. A partir de esta problemática, se vuelve necesario promover tecnologías que sean accesibles y que permitan medir, registrar y controlar de manera más precisa la cantidad de agua utilizada en el riego. Entre estas opciones se encuentran los lisímetros de pesaje, que trabajan con galgas extensiométricas y sensores de humedad, que han

demostrado ser útiles para calcular variables importantes como la evapotranspiración y los coeficientes de cultivo [4]. Sin embargo, su uso en el sector agrícola todavía es reducido, principalmente por los costos y la complejidad que implica su instalación y manejo. Por esta razón, es importante desarrollar prototipos más económicos y fáciles de implementar, que ayuden en la toma de decisiones técnicas y permitan mejorar el uso del recurso hídrico, favoreciendo prácticas agrícolas más sostenibles y viables desde el punto de vista económico.

## JUSTIFICACIÓN

Esta investigación se justifica por la necesidad de mejorar el uso del recurso hídrico en los sistemas de producción agrícola, ya que el riego representa uno de los mayores consumos de agua dentro del sector. Cuando el riego no se maneja de manera adecuada, se generan impactos tanto ambientales como económicos y productivos que pueden afectar directamente el rendimiento del cultivo. La principal motivación de este estudio es buscar alternativas tecnológicas que permitan medir y controlar con mayor precisión el consumo real de agua en los cultivos. Muchas veces no se cuenta con información técnica confiable sobre las necesidades hídricas del suelo y de la planta, lo que provoca aplicaciones excesivas de riego, desperdicio de agua y un aumento en los costos de producción. Además, distintos estudios han demostrado que la incorporación de tecnologías de agricultura de precisión, como sensores de humedad y sistemas de monitoreo del riego, ayudan a mejorar el uso del agua sin afectar la productividad del cultivo [2].

Bajo este contexto los beneficiarios directos de este trabajo son los pequeños y medianos productores agrícolas, quienes podrán contar con información técnica confiable para optimizar la planificación del riego y disminuir pérdidas del agua, así como instituciones académicas y centros de investigación interesados en el diseño de soluciones tecnológicas orientadas a la gestión hídrica. Desde una perspectiva de factibilidad, este proyecto se apoya en el uso de tecnologías que han demostrado su efectividad en estudios previos, tales como los lisímetros de pesada combinados con sensores junto con sistemas de adquisición de datos, que permiten medir parámetros claves como la evapotranspiración y el consumo real del agua del cultivo con alta precisión [4]. La construcción del prototipo se hizo aprovechando componentes que se encuentran en el mercado y herramientas accesibles, esto permitió que tanto el presupuesto como la parte técnica se mantuvieran bajo control durante las pruebas experimentales.

El alcance de este trabajo se centró en diseñar y armar un sistema de lisímetros para macetas bajo condiciones controladas. Esto implicó desde construir la estructura mecánica hasta integrar los sensores y sistemas de control para que todo funcionara bien. También se incluyeron las pruebas iniciales y la validación de la implementación para ver qué tan bien medía el consumo de agua del sustrato. Todo este proceso se basa en métodos ya conocidos para medir el balance hídrico y la evapotranspiración, que sugieren que evaluar estos equipos en la práctica y esta es la clave para mejorar el riego [4]. Los resultados alcanzados constituyen

un soporte técnico para investigaciones posteriores y para la posible ampliación del sistema hacia aplicaciones de mayor escala, orientadas a la automatización del riego y al uso sostenible del recurso hídrico en el ámbito agrícola.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Implementar un sistema de lisímetros para macetas en la Estación de Investigación e Innovación de Ciencias de la Vida y el Desarrollo Sostenible.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Implementar la estructura mecánica junto con los componentes electrónicos asegurando una adecuada disposición y conexión de los sensores y dispositivos de medición para garantizar un monitoreo confiable de las señales.
- Integrar los componentes mecatrónicos sobre la estructura diseñada en un trabajo de integración curricular previo a la conectividad entre el hardware y el software del sistema estableciendo los procesos de comunicación y adquisición de datos hacia una plataforma en la nube mediante PLC para la gestión y almacenamiento eficiente de la información obtenida.
- Efectuar pruebas de funcionamiento de los lisímetros utilizando macetas que permitan verificar la precisión en la medición de datos y el correcto registro de la información en la nube para la evaluación de su desempeño en condiciones reales de operación del sistema.

# CAPÍTULO I

## MARCO CONTEXTUAL Y TEÓRICO

En este capítulo se explican los conceptos básicos que justifican el uso de lisímetros en la agricultura, sobre todo pensando en el problema del desperdicio de agua en el riego. Aquí revisamos cómo funcionan estas plantas, cómo se clasifican y cómo la tecnología actual permite conectarlos a sensores y sistemas de adquisición de datos. También se analiza la importancia de los lisímetros en la medición del balance hídrico y en la optimización del riego, resaltando su aporte a una gestión más sostenible del recurso hídrico en el sector agrícola. Finalmente, se revisan estudios recientes que permiten comprender la evolución de estos instrumentos y su aplicación en el desarrollo de soluciones tecnológicas orientadas a mejorar el manejo del agua en la agricultura.

### **1.1 Lisímetros y su aplicación en la agricultura moderna**

Los lisímetros son dispositivos que permiten cuantificar el consumo de agua en los cultivos analizando la relación entre el suelo, la planta y el clima. Si bien su uso empezó en la investigación académica para calcular la evapotranspiración, no obstante, en los últimos años ahora se están aplicando directamente para mejorar la gestión del riego. Esta evolución se debe a que la agricultura moderna exige mitigar el desperdicio del agua y buscar formas de producción que sean mucho más sostenibles.

En la agricultura moderna, los lisímetros ya no son solo herramientas para experimentos si no sistemas que pueden integrarse con sensores electrónicos y tecnologías digitales. Esta unión hace que los datos que recogen sirvan realmente para decidir cuándo y cuánto regar en el día a día en el campo. Varios estudios actuales muestran que, al sumar sistemas que guardan datos y monitorean todo el tiempo, estos equipos son mucho más útiles para la agricultura de precisión, ya que se pueden aplicar en situaciones reales y no solo en teoría [5].

Usar tecnología como los lisímetros permite medir con precisión el agua que aprovecha el cultivo, lo cual es clave para no regar de más y ajustarse a lo que la planta pide, Además de medir, estos equipos pueden formar parte de sistemas automáticos de control. Esto ayuda a que

el riego no solo sea más eficiente, sino que también cumpla con los estándares de sostenibilidad que se exigen hoy en la agricultura [6].

### ***1.1.1 Tipos de lisímetros y sus funciones***

Los lisímetros se clasifican principalmente por cómo funcionan y el tipo de datos que entregan sobre el agua en el suelo. Es muy importante entender esta clasificación para elegir el equipo correcto según lo que se quiera medir. En términos generales, existen los de drenaje y los de pesaje, estos últimos son los preferidos cuando se busca máxima precisión para saber exactamente cuánto agua consume el cultivo [5].

### ***1.1.2 Funcionamiento de los lisímetros de pesaje***

Los lisímetros de pesaje funcionan midiendo todo el tiempo cuánto cambia el peso de la maceta o el bloque del suelo con la planta, así se sabe directamente cuánta agua se pierde por evapotranspiración. Normalmente, estos equipos usan sensores de carga o galgas para notar cualquier cambio de peso por mínimo que sea, dándonos datos confiables al momento. En la Figura 1 se puede ver un modelo real donde se distingue la estructura de soporte y el sensor que hace el trabajo. Diseños parecidos se están usando mucho ahora para sacar coeficientes de cultivo y mejorar el riego tecnificado, ya que son muy precisos para la agricultura moderna [4,6].



**Figura 1.** Ejemplo real de un lisímetro de pesaje con sistema de medición mediante galgas extensiométricas [4].

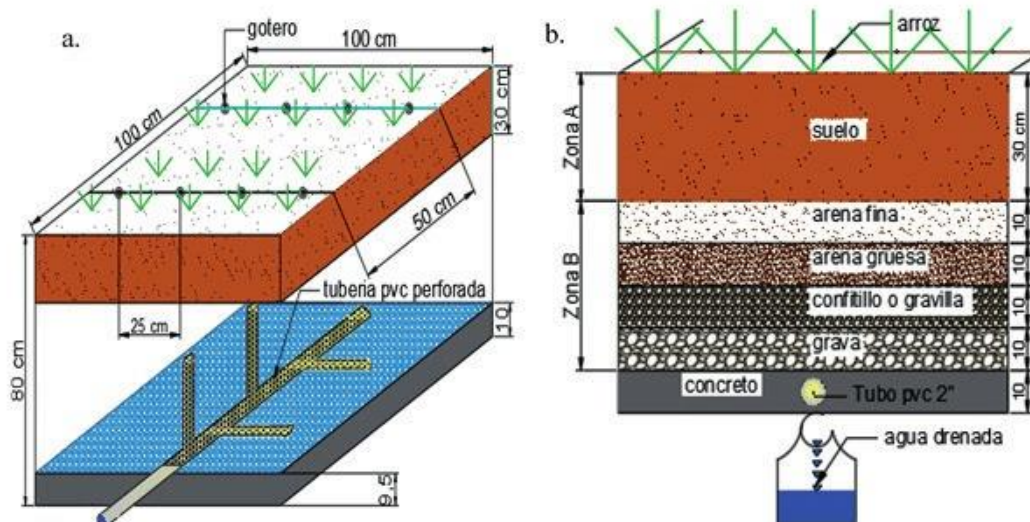
Desde un enfoque de implementación tecnológica, los lisímetros de pesaje destacan por su capacidad de integrarse con sistemas automatizados de riego y plataformas de monitoreo. Hoy la información obtenida a partir de estos dispositivos puede utilizarse como variable de entrada para la toma de decisión relacionada con la programación del riego, mientras que el registro continuo del peso facilita el ajuste de las láminas aplicadas conforme a la necesidad real de cultivo, hoy tal como se ha demostrado en lisímetros de precisión a pequeña escala utilizados para evaluar estrategias de riego eficientes [6].

### ***1.1.3 Lisímetros de Drenaje***

Los lisímetros de drenaje corresponden a dispositivos diseñados para cuantificar el volumen de agua que se infiltra a través del perfil del suelo, lo que permite estimar el balance hídrico del sistema suelo-planta mediante la medición de las entradas y salidas de agua. Su principio de funcionamiento se fundamenta en el aislamiento de un volumen representativo de suelo, en el cual el agua aplicada, ya sea por riego o precipitación, se desplaza verticalmente hasta ser recolectada en la parte inferior del sistema, concepto que ha sido ampliamente documentado en investigaciones orientadas a la cuantificación de los componentes del balance hídrico [5].

Para entender de mejor manera como funcionan estos equipos, en la Figura 2 se detalla un esquema de un lisímetro de drenaje. En el gráfico se puede apreciar claramente cómo se organizan las capas del suelo de forma estratificada y cuáles son las piezas principales que permiten recolectar el agua filtrada. Este diseño es clave porque muestra el camino que sigue el líquido desde que entra al sustrato hasta que llega al sistema de recolección en la base.

El diseño incluye una capa superficial correspondiente al suelo cultivado, seguida de capas filtrantes de arena fina y grava, las cuales facilitan el flujo del agua percolada hacia un sistema de recolección. En la base del equipo, instalamos un tubo perforado que se encarga de llevar el agua filtrada hacia un recipiente de recolección para su análisis. Esta configuración es muy común en investigaciones sobre drenaje, ya que permite estudiar a fondo el comportamiento hídrico del sustrato y verificar si el riego está cumpliendo su función de manera óptima [6].



**Figura 2.** Esquema de un lisímetro de drenaje empleado para el balance hídrico del suelo [6].

Los trabajos de implementación con lisímetros de drenaje han permitido identificar pérdidas por percolación profunda y evaluar la eficiencia de distintas estrategias de riego. Aunque la evapotranspiración se obtiene de forma indirecta mediante el balance hídrico, estos instrumentos siguen siendo una herramienta válida para caracterizar el movimiento del agua en parcelas reales y apoyar la gestión técnica del riego dentro de esquemas sostenibles [6].

## 1.2 Análisis de los lisímetros de drenaje y de pesada aplicados a la gestión del riego agrícola

La adecuada determinación del balance hídrico del suelo constituye un elemento clave para mejorar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura. En este marco, los lisímetros son utilizados como herramientas experimentales que permiten evaluar los flujos de entrada y salida de agua dentro del sistema suelo-planta. Entre los dispositivos más empleados se destacan los lisímetros de drenaje y los lisímetros de pesada, los cuales presentan diferencias relevantes en cuanto a su principio de funcionamiento, nivel de precisión y complejidad técnica, características que se resumen en la Tabla 1. La comparación entre ambos tipos resulta fundamental para seleccionar el equipo más apropiado según los objetivos del estudio, los recursos disponibles y las condiciones de aplicación en campo.

**Tabla 1.** Lisímetro de drenaje vs. Lisímetro de pesada

<b>Característica</b>	<b>Lisímetro de drenaje</b>	<b>Lisímetro de pesada</b>
Principio de medición	Cuantifica el volumen de agua drenada a través de del perfil del suelo.	Mide los cambios de masa del sistema suelo-planta mediante sensores de peso.
Variable principal	Drenaje profundo y balance hídrico indirecto.	Evapotranspiración real y almacenamiento de agua.
Forma de medición	Indirecta, basada en el agua recolectada por percolación.	Directa, mediante variaciones de peso continuas.
Nivel de precisión	Medio	Alto (Método de referencia).
Instrumentación	Recipientes de drenaje y sensores de humedad.	Galgas extensiométricas o celdas de carga sistema DAQ
Complejidad técnica	Baja	Alta
Costo de implementación	Bajo a medio	Alto
Aplicaciones comunes	Estudios de eficiencia de riego y pérdidas por percolación.	Determinación de evapotranspiración y coeficientes de cultivo.
Limitaciones	No mide directamente la evapotranspiración.	Sensible a vibraciones y condiciones ambientales.

### ***1.2.1 Importancia de los Lisímetros en la Gestión de Riego***

La información generada a partir de los lisímetros, tanto de pesaje como de drenaje, es fundamental para una gestión eficiente del agua en la actividad agrícola. Estos dispositivos permiten determinar el consumo real de agua de los cultivos y evaluar el comportamiento de diferentes estrategias de riego, contribuyendo así a la optimización del uso del recurso hídrico. De esta manera, los lisímetros pasan de ser un apoyo fundamental para decidir técnicamente cómo programar el riego. La idea principal es evitar el desperdicio de agua que ocurre cuando se riega de más, ajustando las aplicaciones a lo que realmente se necesita [6].

Diversos estudios destacan que la integración de datos provenientes de instrumentos de medición del agua del suelo con tecnologías de monitoreo y control favorece el desarrollo de sistemas de riego eficientes y sostenibles. La integración de lisímetros con sensores y sistemas

de adquisición de datos refuerza la agricultura de precisión y contribuye el impacto ambiental asociado al uso ineficiente del agua en la producción agrícola [6].

### ***1.2.2 Evaluación técnica para la construcción del sistema***

Al momento de elegir un lisímetro para un prototipo, no solo importa cómo mide, sino qué tan fácil es de construir y poner a funcionar. De acuerdo con lo que plantea Nolz [4], los sistemas de drenaje son una excelente opción porque miden directamente el agua que se pierde por percolación sin necesitar una estructura mecánica tan complicada. Esto los hace ideales cuando buscamos evaluar la eficiencia del riego directamente en el campo de forma sencilla y efectiva.

En contraste, los lisímetros de pesaje posibilitan registrar con mayor resolución temporal el consumo real del agua por parte del cultivo, lo que resulta ventajoso cuando se busca un control más detallado del riego. Asimismo, Molina et al. [7] se muestra que la combinación de lisímetros de drenaje con sensores de humedad del suelo puede emplearse para estimar parámetros agronómicos relevantes, como el coeficiente de cultivo, aportando información útil para la gestión del riego. En este contexto, la integración de lisímetros, sensores y plataformas de adquisición de datos representa una alternativa viable y replicable para parcelas agrícolas, contribuyendo a la optimización del recurso hídrico sin afectar el desarrollo vegetal.

## **1.3 Lisímetros de Pesaje en Sistema de Riego**

El lisímetro de pesaje se integra al sistema de riego como un elemento de retroalimentación que permite evaluar el comportamiento hídrico del sistema suelo-cultivo. El principio de funcionamiento se sustenta en el registro de las variaciones de masa producidas por el ingreso de agua al suelo y por las salidas asociadas al consumo del cultivo, principalmente la evapotranspiración.

### ***1.3.1 Principio de Funcionamiento***

Según lo descrito por Sagar et al. [8] estos dispositivos incorporan celdas de carga con galgas extensiométricas, las cuales convierten los cambios de peso en señales eléctricas procesables

mediante sistemas de adquisición de datos. Investigaciones posteriores confirman que el método de pesada directa permite obtener mediciones continuas y confiables, siendo compatible con plataformas de microcontroladores como Arduino y sistemas DAQ de arquitectura abierta [5].

### ***1.3.2 Ventajas para Control Hídrico***

Las ventajas de este tipo de lisímetros se relacionan con la capacidad de detectar en tiempo real sobre riego y ajustar las láminas aplicadas. Estudios desarrollados por Lyes et al. [5] evidencian que los lisímetros de pesaje permiten diferenciar el consumo efectivo del agua del cultivo frente a las pérdidas por drenaje profundo, fortaleciendo la eficiencia del riego sin comprometer el rendimiento agrícola.

### ***1.3.3 Aplicación de tecnologías de precisión en el monitoreo hídrico***

Los lisímetros de pesaje se han convertido en una pieza clave de la agricultura de precisión al integrarse con sensores electrónicos y de automatización de bombeo. Como se menciona en estudios actuales, esta combinación tecnológica permite una gestión mucho más exacta, basándose en la información que el sistema suelo, planta y clima genera en tiempo real, lo que evita basarse solo en cálculos teóricos [2]. Además, experiencias de implementación reportadas por Molina et al. [7] muestran que los prototipos basados en plataformas como Arduino permiten trasladar esta lógica a sistemas aplicados y accesibles para pequeños productores.

## **1.4 Control de la humedad en el sustrato**

### ***1.4.1 Relevancia en el manejo de cultivos***

La disponibilidad de humedad en el perfil del suelo es un factor crítico para el desarrollo vegetal y la eficiencia en el uso del agua. Como bien mencionan Kumar Yadav y Cassel Sharma, si monitoreamos la humedad podemos saber con exactitud los momentos y las cantidades de riego necesarias. Esto es fundamental para no pasarnos con el agua y evitar que se termine desperdiciando un recurso tan valioso como el agua [1]. En sistemas de riego tecnificado, la medición continua mediante sensores adecuados contribuye significativamente a optimizar el uso del agua y a reducir pérdidas por drenaje profundo o evaporación no productiva.

#### ***1.4.2 Relación con el desarrollo vegetal***

El estado hídrico del suelo incide de manera directa en los procesos fisiológicos de la planta, como la captación de nutrientes, el vigor vegetativo y la adaptación al estrés hídrico. Estudios recientes realizados en condiciones de campo, como los reportados por Kuunya, evidencian que un manejo adecuado de la humedad del suelo mejora la eficiencia del cultivo y favorece un desarrollo vegetal equilibrado [9].

#### ***1.4.3 Rangos óptimos***

Los rangos de humedad considerados óptimos dependen de la textura del suelo, la densidad aparente y el tipo de cultivo. En este sentido, Loconsole señala que la correcta calibración de los sensores de humedad es fundamental para interpretar de manera técnica la disponibilidad real del agua en el suelo y evitar condiciones de déficit o saturación que afectan el rendimiento del cultivo [10].

### **1.5 Sensores Aplicados a la Medición Hídrica**

#### ***1.5.1 Sensores de Humedad***

Los sensores de humedad del suelo son dispositivos encargados de medir el contenido matricial de agua en el suelo. Según Molina et al. [7] los enfoques modernos basados en principios y dieléctricos o capacitivos permiten convertir las variaciones del medio en señales eléctricas que pueden ser digitalizadas e integradas a sistemas de riego automatizados, mejorando la utilización del agua sin alterar el desempeño del cultivo.

#### ***1.5.2 Sensores de Peso (celdas de carga)***

En lisímetros de pesaje, los sensores de carga equipadas con galgas extensiométricas son los componentes que permiten transformar la variación de masa del sistema suelo-planta en señales eléctricas perceptibles. De acuerdo con Sagar et al. [8], estos sistemas han sido utilizados para estimar con alta precisión la evapotranspiración y apoyar decisiones técnicas en el manejo del riego agrícola.

## **1.6 Sistemas DAQ para adquisición de datos**

### ***1.6.1 Función***

Tiene como función central capturar, acondicionar, convertir y almacenar señales provenientes de sensores. En el contexto agrícola, Lyes et al. [5] señalan que el DAQ Constituye el núcleo del análisis del balance hídrico, ya que permite registrar las variables relevantes a lo largo del tiempo y respaldar la toma de decisiones técnicas en el riego.

### ***1.6.2 Conexión y sincronización de sensores***

El sistema DAQ se conecta con los sensores de humedad, peso y temperatura para organizar todos los datos en registros de tiempo. Como bien señala Loconsole en sus investigaciones, la forma en que se integran estos componentes es clave, si la conexión es buena, los datos serán precisos y el sistema realmente servirá para que la toma de decisiones automatizadas [10].

### ***1.6.3 Ventajas de la automatización en el riego***

Automatizar el riego significa lograr que el sistema opere por sí solo mediante reglas basadas en datos. Esto depende directamente, es vital contar con un buen equipo de adquisición de datos que recoja y procese la información de los sensores sin errores. Estudios actuales confirman que, al integrar estos sistemas DAQ, es posible programar con exactitud cuándo y cuánto regar según lo que pida el cultivo, esto no solo mejora la eficiencia, sino que evita que las plantas sufran estrés hídrico en las parcelas de prueba [6,11].

## **1.7 Herramientas tecnológicas en la gestión de riego**

### ***1.7.1 Integración de sistemas inteligentes***

Estos sistemas combinan la medición constante con la automatización para que el uso de recursos, especialmente el agua, sea lo más eficiente posible. Según explican Lakhiar et al. [2], la gran ventaja de unir sensores y sistemas DAQ con controles automatizados es la capacidad de generar un flujo de datos sin interrupciones. Esto permite que el manejo del riego no dependa de estimaciones, sino de información objetiva y actualizada.

### ***1.7.2 Automatización***

En términos sencillo, automatizar significa que el sistema puede regar por sí solo sin que una persona tenga que estar presente, activando bombas y válvulas mediante los datos que recogen. Como se menciona en investigaciones sobre el riego inteligente, este método es clave para no desperdiciar agua y, al mismo tiempo, ayuda a gastar menos energía y a mejorar los resultados de la cosecha [11].

### ***1.7.3 Enfoque de Implementación***

Más allá del análisis teórico este enfoque busca aterrizar el conocimiento en un prototipo funcional. La idea es que el sistema no solo sirva para tomar datos, sino que sea una herramienta real que los agricultores o técnicos puedan manejar directamente en sus campos para facilitar el control del riego. Este enfoque requiere seleccionar tecnologías disponibles, asequibles y compatibles entre sí. Experiencias recientes documentadas por Molina et al. [7] muestran que microcontroladores como Arduino permiten integrar sensores junto con sistemas de adquisición de datos y actuadores posibilitando la creación de sistemas de riego automatizados replicables y adaptables a diferentes condiciones de cultivo y disponibilidad de recursos.

## **1.8 Comportamiento de la humedad del sustrato y su influencia en el desarrollo vegetal**

La humedad del suelo constituye un factor clave en el desarrollo vegetal, dado que influye directamente en procesos fisiológicos fundamentales como la absorción de agua y nutrientes, la transpiración y la fotosíntesis. Desde la perspectiva de la física del suelo, el agua se retiene en los poros del sustrato mediante fuerzas de naturaleza capilar y matricial, siendo únicamente una fracción de esta la que resulta efectivamente disponible para el sistema radicular de las plantas [12].

La disponibilidad de agua para las plantas se establece principalmente entre dos condiciones hídricas del suelo: la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. La capacidad de campo se define como el contenido de agua que permanece retenido en el suelo una vez finalizado el drenaje gravitacional, mientras que el punto de marchitez permanente corresponde al nivel mínimo de humedad a partir del cual las plantas ya no son capaces de extraer agua del

sustrato [13]. Mantener la humedad en este rango es clave para que las plantas crezcan sin problemas y se desarrollen como deben.

Diversos estudios agronómicos han demostrado que, para la mayoría de los cultivos, el rango óptimo de humedad del sustrato se sitúa aproximadamente en un rango comprendido entre 60 y 80% de la capacidad de campo. En este intervalo, el agua se encuentra disponible sin provocar condiciones de saturación, lo que favorece el crecimiento radicular, el transporte de nutrientes y la actividad microbiana del suelo [14]. Por el contrario, valores inferiores generan estrés hídrico, reduciendo la tasa fotosintética y el crecimiento de la planta, mientras que niveles elevados disminuyen la aireación del suelo y aumentan la probabilidad de enfermedades radiculares.

El impacto de la humedad del sustrato varía además según la etapa fenológica del cultivo. Durante las fases iniciales, una humedad adecuada facilita el establecimiento del sistema radicular; en etapas reproductivas, el déficit hídrico puede ocasionar disminuciones significativas en el rendimiento del cultivo y la calidad del producto obtenido [13]. Por esta razón, el monitoreo continuo de la humedad del sustrato es una práctica clave para ajustar estrategias de riego basadas en el requerimiento real de la planta.

En sistemas de cultivo en macetas las variaciones de humedad ocurren de forma más rápida debido al volumen reducido de sustrato y a la escasa capacidad de retención de agua. En este contexto, los lisímetros de pesaje permiten cuantificar con alta precisión las pérdidas de agua asociadas a la evapotranspiración, proporcionando información confiable para mantener condiciones hídricas controladas y reproducibles en estudios experimentales [15].

## **1.9 Simulación y modelado del comportamiento hídrico**

Antes de construir físicamente un lisímetro de pesaje, es la clave pasar por una etapa de modelado y simulación computacional. Esto nos permite predecir cómo se comportará el equipo sin los costos de una implementación inmediata. Al usar modelos matemáticos, podemos entender de mejor manera la dinámica del agua en el sustrato y cómo responderá el sistema de medición ante diferentes escenarios operativos [15].

En la parte hidráulica, herramientas como HYDRUS-1D son fundamentales para representar el movimiento del agua en suelos no saturados, tomando en cuenta la conductividad y el potencial métrico bajo condiciones de riego y drenaje [16]. Al integrar variables como el agua aplicada y las pérdidas por evapotranspiración, el balance hídrico se vuelve una guía para diseñar estrategias de riego que realmente ahorren recursos, permitiendo calcular con exactitud lo que el cultivo pide según el clima [17]. Además, la simulación nos ahorra tiempo al evaluar escenarios hipotéticos que en el campo tomarían meses probar.

En los lisímetros de pesaje, esto es especialmente útil para relacionar los cambios de peso en las celdas de carga con el consumo real de la planta. Si combinamos estos modelos con sistemas DAQ, podemos validar que tan sensible es nuestro equipo y mejorar su calibración antes de llevarlo a campo [18]. Estudios recientes confirman que unir la simulación con las pruebas experimentales da como resultado sistemas mucho más robustos y precisos, cumpliendo con los objetivos de la agricultura de precisión y la sostenibilidad [8,19].

## CAPÍTULO II

### ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

En esta sección se aplican alternativas tecnológicas elegidas para implementar los lisímetros de maceta en el campo. Al tratarse de la aplicación de un modelo previamente validado, el enfoque no es comparar múltiples sistemas, sino ejecutar el diseño ya establecido. Aquellas decisiones estructurales quedaron fijadas en la investigación antecedente, donde se realizó el diseño detallado y el análisis del balance hídrico mediante pesaje [20].

Por lo tanto, el contenido se centra en justificar los elementos utilizados, basándose en la existencia de materiales en el mercado, la coherencia con los planos originales y los requerimientos operativos de la Estación de Investigación e Innovación de Ciencias de la Vida y Desarrollo Sostenible.

#### **2.1 Alternativa implementada para el sistema de lisímetro**

La alternativa implementada corresponde a un lisímetro de pesaje para macetas, cuyo principio de funcionamiento se basa en la medición de variaciones de masa del sistema suelo-planta. Estas variaciones de peso permiten estimar el balance hídrico del cultivo mediante la cuantificación indirecta de la evapotranspiración y el drenaje [21].

El sistema integra una celda de carga para la medición del peso total de la maceta, un sensor capacitivo para el monitoreo de la humedad del suelo, un sensor metálico de nivel de agua destinado a la detección del agua drenada. Además, incorpora una válvula solenoide para el control del riego y un controlador lógico programable Siemens LOGO, el cuál actúa como la unidad central de control del sistema, La arquitectura general del sistema mantiene coherencia con el diseño propuesto en el trabajo previo, garantizando su correcta funcionalidad, confiabilidad y replicabilidad [20].

#### **2.2 Análisis de la configuración de celdas de carga de 150 kg**

En el diseño original del sistema de lisímetro se llevó a cabo un análisis de distintas configuraciones de celdas de carga, considerando disposiciones con una, dos y tres celdas

distribuidas en la estructura. Sin embargo, para la implementación del prototipo se seleccionó la configuración en una sola celda de carga, debido a su simplicidad mecánica y facilidad de integración. El uso de la única celda de carga resulta adecuado para aplicaciones de lisímetros en macetas, donde las cargas se concentran principalmente en un único punto de apoyo. Esta configuración permite realizar una medición confiable de las variaciones de peso asociadas al consumo hídrico del cultivo y al drenaje del sistema, reduciendo errores de alineación y simplificando la calibración [22].

### **2.3 Análisis de Sensor SIWAREX WL260 SP-S SA**

En la construcción del sistema se integró una celda de carga de galga extensiométrica, específicamente del modelo SIWAREX WL260 SP-S SA, elegido por su capacidad para detectar variaciones mínimas de masa dentro del lisímetro [23]. Este tipo de sensores es ampliamente utilizado en sistemas de pesaje industrial y experimental debido a su robustez mecánica y amplio rango de medición [24].

La capacidad de carga del sensor proporciona un margen de seguridad adecuado frente al peso total de la maceta, el sustrato, el cultivo y contenido del agua, lo que permite evitar la saturación del sensor durante la operación del sistema. El principio de funcionamiento de la celda de carga se basa en la deformación elástica del cuerpo sensor, la cual es detectada mediante galgas extensiométricas dispuestas en un puente de Wheatstone [24]. La celda de carga fue calibrada experimentalmente mediante masas patrón, obteniendo una respuesta estable y repetible. Dado que el objetivo del sistema es el monitoreo de variaciones relativas de peso y no la medición metrológica de alta precisión, la celda de carga seleccionada resulta adecuada para la implementación del lisímetro [25].

### **2.4 Evaluación de la Celda de Carga para la Medición del Agua Rechazada**

Para la medición del agua rechazada o drenada de lisímetros se utilizó el sensor SP4M, una celda de carga tipo viga diseñada para aplicaciones de pesaje de baja capacidad. Este sensor permite cuantificar el volumen de agua drenada mediante la medición de su peso contribuyendo al análisis del balance hídrico del sistema [26].

El sensor SP4M presenta un diseño compacto y una buena estabilidad mecánica, lo que facilita su integración en el sistema de drenaje. Su principio de funcionamiento se basa igualmente en galgas extensiométricas como se muestra en la Figura 3, permitiendo una medición confiable del agua rechazada durante el funcionamiento del sistema [26].



**Figura 3.** Sensor SP4M [26].

## 2.5 Evaluación del Sensor para Monitoreo de Humedad del Suelo

El monitoreo del contenido hídrico del sustrato se realizó mediante un sensor capacitivo de humedad del suelo versión 1.2 indicado en la Figura 4, el cual mide la variación de la permitividad dieléctrica del suelo en función de su contenido de agua. En el sector agrícola, esta tecnología es muy valorada por su durabilidad frente a la oxidación y su consistencia en las lecturas, lo que justifica su implementación en este sistema [27].



**Figura 4.** Sensor capacitivo de humedad del suelo versión 1.2 [27].

A diferencia de los sensores resistivos, los sensores capacitivos presentan mayor durabilidad en ambientes húmedos y permiten obtener mediciones más estables a largo plazo. Aunque este sensor no corresponde a una alternativa industrial, su uso resulta adecuado para aplicaciones experimentales y de investigación [28].

## 2.6 Evaluación del Controlador Lógico Programable

El sistema de control de lisímetros implementó utilizando un PLC Siemens LOGO, seleccionado por su robustez, confiabilidad y facilidad de programación. Este controlador permite la adquisición de señales analógicas y digitales provenientes de los sensores del sistema, así como el control de los actuadores asociados al riego. El uso del PLC Siemens LOGO garantiza una operación estable del sistema y facilita su integración con plataformas de supervisión y visualización [29]. El controlador utilizado se presenta en la Figura 5.



Figura 5. PLC Siemens LOGO [29].

## 2.7 Evaluación de la Fuente de Alimentación

La alimentación eléctrica del sistema se realizó mediante una fuente de poder Siemens LOGO, diseñada específicamente para el funcionamiento del PLC. Esta fuente proporciona niveles de voltaje estables y protegidos, hola asegurando una operación confiable del sistema de lisímetro durante su implementación [30].

## 2.8 Selección de la Válvula de Control de Riego

El control de flujo de agua en el sistema se realizó mediante una válvula solenoide de acción individual, la cual permite la apertura y el cierre del suministro de agua de forma controlada. En proyectos de riego automático, se suele optar por este modelo de válvula debido a que combina un diseño sencillo con un funcionamiento muy confiable, que reduce la necesidad de mantenimiento [31]. La válvula solenoide implementada se muestra se muestra en la Figura 6.



**Figura 6.** Válvula solenoide implementada [31].

## **2.9 Evaluación Sensor Nivel de Agua**

El sistema incorpora un sensor de nivel de agua metálico mostrado en la Figura 7 utilizado para detectar la presencia de agua en el sistema de drenaje de lisímetro. Con este sensor se logra vigilar el volumen de agua de rechazo para evitar cualquier desborde, lo que sirve como un respaldo ideal para los datos que ya estamos registrando con la celda de carga [32].



**Figura 7.** Sensor de nivel de agua [32].

## **2.10 Selección y propiedades del material estructural**

Para el análisis estructural del sistema de soporte se optó por el acero estructural AISI A36, una elección basada en su equilibrio entre resistencia mecánica, bajo costo y facilidad de adquisición. Este material es un estándar en la construcción de bastidores y plataformas que soportan cargas estáticas, lo que encaja perfectamente con las necesidades de un montaje.

Con un límite de fluencia de 250 MPa y una resistencia a la tracción de 400 MPa, el AISI A36 ofrece la solidez necesaria para cargar la maceta, el sustrato y el agua sin riesgos. Estas cifras aseguran que la estructura trabaje siempre en su rango elástico, evitando que el soporte se deforme de manera permanente durante las pruebas [33]. Además, su excelente soldabilidad permite realizar cortes y uniones con procesos convencionales, algo vital si se necesitan hacer ajustes o mejoras rápidas durante la fase de implementación del prototipo [34].

Otro factor determinante en la selección de este material es su bajo costo relativo y amplia disponibilidad en el mercado local, en comparación con aceros de mayor resistencia mecánica. Esto permite reducir los costos de fabricación sin comprometer la seguridad estructural del sistema. Por estas razones, el acero AISI A36 es comúnmente recomendado para estructuras metálicas de soporte en aplicaciones industriales ligeras y proyectos de investigación, justificando su selección para el análisis estructural del lisímetro [35].

## **2.11 Resumen de la Alternativa Ganadora**

La alternativa seleccionada resulta ganadora porque implementa de forma efectiva y coherente un diseño previamente validado, priorizando la simplicidad, confiabilidad y disponibilidad real de los componentes sin comprometer la funcionalidad del sistema de lisímetros para macetas. El uso de una sola celda de carga de 150 kg simplifica la estructura mecánica, reduce errores de alineación y facilita la calibración, siendo suficiente para medir con precisión las variaciones de peso asociadas al balance hídrico del cultivo. La integración de sensores complementarios (humedad del suelo, nivel de agua y drenaje) permite un monitoreo integral del sistema suelo-planta-agua.

Además, la selección del PLC Siemens LOGO, junto con su fuente de alimentación dedicada, garantiza robustez operativa, estabilidad eléctrica y facilidad de programación, aspectos clave para una aplicación experimental continua. Finalmente, el uso del acero estructural AISI A36 asegura resistencia mecánica, bajo costo y facilidad de fabricación, haciendo que el sistema sea seguro, replicable y viable dentro de un entorno de investigación. Los principales criterios técnicos y componentes que sustentan esta selección se resumen en la Tabla 2, donde se desatanca los elementos más relevantes de la alternativa implementada. En conjunto, esta alternativa equilibra funcionalidad, confiabilidad, economía y replicabilidad, lo que justifica su selección como la opción ganadora.

**Tabla 2.** Elementos clave de la alternativa ganadora del sistema de lisímetro

<b>Elemento</b>	<b>Selección realizada</b>	<b>Justificación</b>
Tipo de sistema	Lisímetro de pesaje para macetas	Permite estimar evapotranspiración y drenaje mediante variaciones de masa.
Configuración de celdas de carga	1 celda de carga	Simplifica el diseño mecánico y la calibración.
Capacidad de la celda principal	150 kg	Proporciona margen de seguridad y evita saturación.
Medición de agua drenada	Galga extensiométrica SIWAREX WL260 SP S SA	Permite cuantificar el agua rechaza de forma confiable
Sensor de humedad del suelo	Sensor capacitivo v1.2	Mayor durabilidad y estabilidad frente a sensores resistivos
Control del sistema	PLC Siemens LOGO	Alta confiabilidad, fácil programación e integración
Alimentación eléctrica	Fuente Siemens LOGO	Voltaje estable y protección eléctrica
Control de riego	Válvula Solenoide	Operación simple y confiable del riego
Sensor de nivel de agua	Sensor metálico de nivel	Previene desbordamientos y complementa la medición del drenaje.

## CAPÍTULO III

### DISEÑO Y ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN

El presente capítulo aborda de manera detallada las etapas asociadas al diseño y la construcción del sistema de lisímetros para macetas. Se abordan los principales retos técnicos previamente identificados y se fundamenta la selección de componentes, así como las configuraciones adoptadas, con el propósito de garantizar un funcionamiento eficiente y sostenible del sistema. Asimismo, se expone la descripción de los materiales utilizados, el procedimiento del ensamblaje y las simulaciones estructurales realizadas, junto con la explicación del principio de operación del sistema. Estos aspectos permiten comprender el desempeño del lisímetro en las tareas de monitoreo y control preciso.

#### **3.1 Representación del flujo operativo del lisímetro de pesaje**

A través del diagrama de flujo se describe el funcionamiento operativo de un sistema automatizado de lisímetros de pesaje, concebido para la cuantificación precisa del balance hídrico en el sistema suelo-planta-atmósfera. El correcto funcionamiento de la máquina tiene sustento en la adquisición continua de las variables de análisis, entre las cuales se incluyen el peso de la maceta, peso de agua excedente, la humedad del suelo y la temperatura, lo que posibilita un análisis detallado del aprovechamiento hídrico del cultivo.

El proceso operativo se encuentra representado en la Figura 8, en la cual se describe de manera secuencial el funcionamiento del sistema desde el inicio del proceso de análisis, hasta el almacenamiento y exportación de los datos registrados en el CSV. Una vez iniciado el proceso, el sistema ejecuta la inicialización y validación de los sensores, así como la incorporación de detección de fallos que aseguran la confiabilidad de las mediciones antes de dar inicio al proceso de adquisición de datos, que se evidenciarán con el encendido de la luz piloto roja.

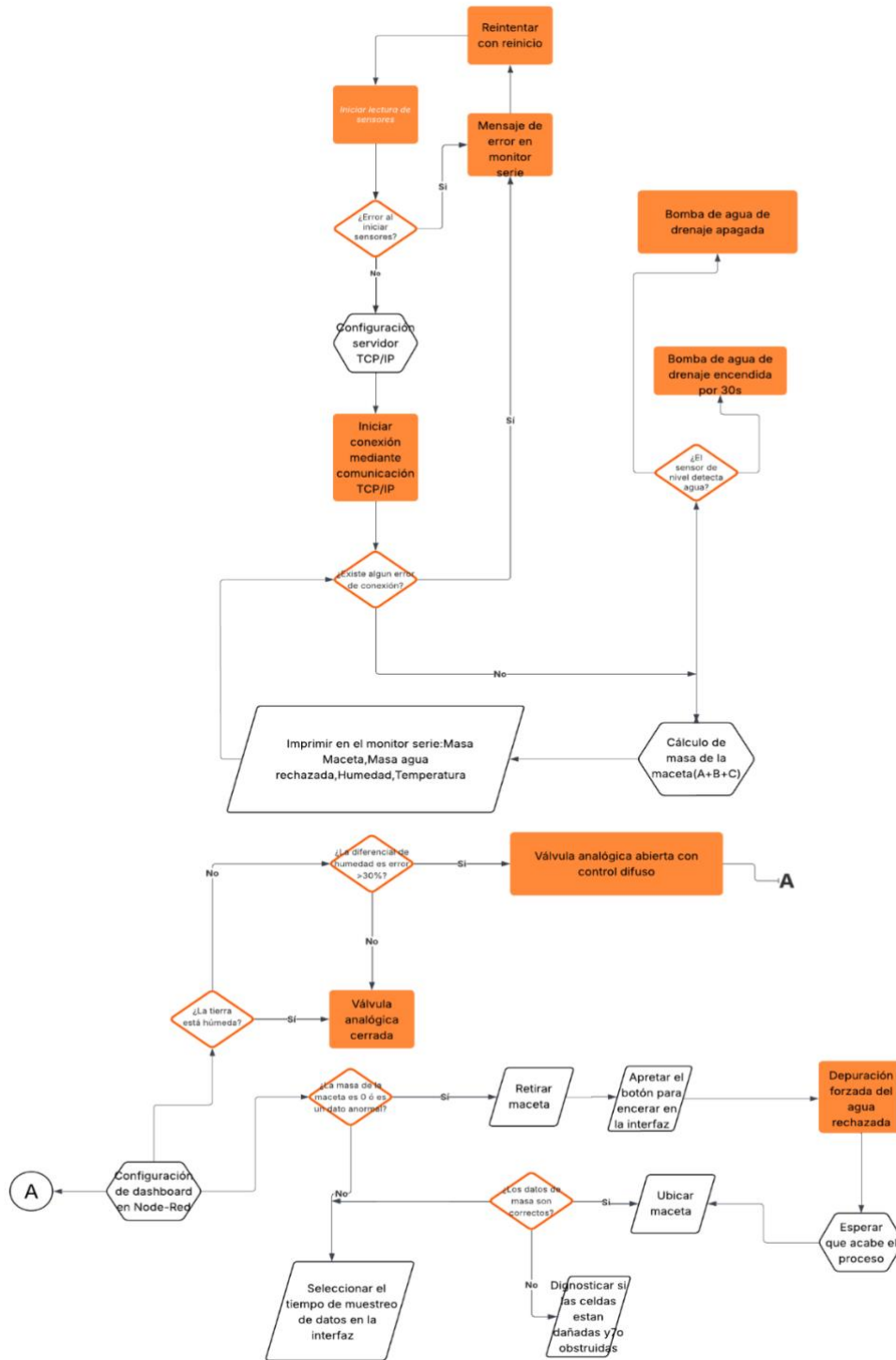


Figura 8. Diagrama de flujo del sistema de lisímetros

La siguiente etapa describe el proceso en el cual se establece la comunicación entre el PLC y la computadora a través el protocolo TCP/IP, que será la encargada de permitir una transferencia eficiente de datos obtenidos hacia la plataforma Node-RED, en la cual se procede a implementar una interfaz gráfica para la visualización en tiempo real de las variables medidas y la configuración de parámetros, tales como el intervalo de muestreo e interruptores manuales de encendido de los actuadores en caso de fallo de sensores.

La máquina incluye además un módulo de gestión de agua excedente, el cual activa una bomba de drenaje únicamente cuando se detecta acumulación de agua, asegurando un funcionamiento eficiente y evitando el derramamiento del recurso a optimizar que en este caso es el agua. Todas las lecturas validadas se registran de manera organizada en una base de datos de Excel, lo que posibilita generar una gestión de análisis del recurso.

Finalmente, el sistema permite la exportación de los datos almacenados hacia archivos compatibles con Excel, facilitando el procesamiento, análisis estadístico y generación de resultados experimentales. La integración entre el PLC, la comunicación TCP/IP, la interfaz en Node-RED y la base de datos proporciona una arquitectura robusta y confiable, adecuada para aplicaciones de investigación agronómica y monitoreo hídrico en sistemas de lisímetros.

### **3.2 Presentación del sistema propuesto**

El sistema de lisímetros de pesaje fue concebido con el objetivo de llevar a cabo el monitoreo automatizado de las condiciones hídricas del suelo en macetas. Para este fin, se incorporan dispositivos de medición de alta precisión, entre ellos celdas de carga y sensores de humedad, responsables de obtener información relevante sobre el estado del sistema suelo-planta. Los datos obtenidos son procesados por un controlador central basado en un PLC Siemens LOGO, el cual coordina el funcionamiento general del sistema.

A partir de la información procesada el controlador ejecuta acciones automáticas relacionadas con el control del riego mediante válvulas motorizadas, garantizando un suministro adecuado de agua según las condiciones medidas. El sistema contempla además la medición del agua rechazada como parte del análisis del balance hídrico, sin que exista un proceso de recirculación de dicha agua dentro del sistema.

La transferencia de información entre el PLC y la computadora se lleva a cabo a través de una conexión cableada que emplea el protocolo TCP/IP, lo cual asegura una transmisión de datos estables y confiable. Las variables registradas se transfieren a una interfaz gráfica implementada en Node-RED, desde la cual el usuario puede consultar la información del sistema y modificar parámetros de operación. Este enfoque asegura que las decisiones de control se fundamentan en mediciones reales del estado del suelo, contribuyendo a un uso eficiente del recurso hídrico y a la confiabilidad del proceso de seguimiento del sistema. En los apartados posteriores se detalla la forma en que se articulan los diferentes componentes del sistema y el flujo operativo establecido.

### **3.3 Funcionamiento del sistema**

#### ***3.3.1 Supervisión del Pesaje y Parámetros del Suelo***

El proceso inicia con la adquisición de información obtenida a partir de las celdas de carga SIWAREX WL260 SP-S SA y el sensor capacitivo HD-130 para la medición de la humedad del suelo. Las celdas de carga permiten detectar las variaciones existentes en el peso de las macetas de la muestra del sembrío que se analice, siendo esta información fundamental para analizar los cambios asociados al contenido hídrico de la tierra. De forma complementaria, el sensor capacitivo proporciona el nivel de humedad del suelo, permitiendo evaluar el estado adecuado en el cual las plantas generan un desarrollo óptimo.

Una vez que se recolecten los datos por ambos sensores, se procede a ser enviados al PLC Siemens LOGO, donde se realiza la etapa de instrumentación. Esta etapa permite verificar la amplificación de los valores obtenidos por las mediciones y asegurar que la información utilizada para el control del sistema se pueda procesar posteriormente para su visualización y almacenaje con condiciones reales del suelo.

#### ***3.3.2 Control Óptimo del Riego***

A partir de la información procesada, el PLC Siemens LOGO genera una evaluación que el operario ingresa en el programa y así generar el suministro de agua dependiendo del tipo de planta analizada. Cuando las mediciones indican que el nivel de humedad del suelo se encuentra por debajo de los parámetros establecidos, el controlador activa la válvula solenoide.

El tiempo de apertura de la válvula se define en función de los parámetros de operación configurados en el sistema, lo cual permite generar un control adecuado del riego y optimización del recurso. Este enfoque permite evitar tanto el exceso de agua como la falta de esta, contribuyendo a un uso eficiente del recurso y asegurando condiciones adecuadas para el desarrollo pleno del cultivo.

### ***3.3.3 Transmisión y Procesamiento de Datos***

La información recopilada y procesada por el PLC se envía a una computadora mediante una conexión cableada basada en el protocolo de comunicación TCP/IP. Esta comunicación permite integrar el sistema para el desarrollo de una interfaz gráfica realizada en Node-RED, desde la cual el usuario puede visualizar en tiempo real los parámetros registrados, tales como el peso de la maceta y el valor de humedad del suelo en tiempo real.

De manera adicional a la visualización, la información generada por el sistema se guarda en una base de datos descargable en un archivo CSV, para poder generar posteriormente su análisis. Los registros pueden ser exportados a archivos compatibles con Excel, y analizar los datos obtenidos para sacar el valor adecuado de riego que necesita cada tipo de planta, generando un ahorro económico y obteniendo el máximo provecho de este.

La interfaz desarrollada en Node-RED fue elegida debido a que está desarrollada para poder integrar un control con IOT, además de su amigable interfaz con los usuarios. Mediante gráficos y visualizaciones de datos, el sistema permite supervisar el estado del suelo de forma sencilla, asegurando que las decisiones operativas se basen en una información correcta en tiempo real, generando el máximo ahorro con el desperdicio del agua.

## **3.4 Estructura general del lisímetro**

En la Tabla 3 se presenta el listado de los componentes electrónicos considerados para el diseño del sistema.

**Tabla 3.** Elementos principales del lisímetro y su descripción funcional

<b>N.º</b>	<b>Componente</b>	<b>Descripción</b>
1	PLC Siemens LOGO!	Controlador lógico programable responsable de recibir y procesar las señales provenientes de los sensores, así como de ejecutar las acciones de control del sistema.
2	Celdas de pesaje SIWAREX WL 260 SP-S SA	Sensores industriales de pesaje fabricados en acero inoxidable, con alta precisión. Miden la masa de la maceta de forma confiable.
3	Sensor capacitivo de humedad del suelo v1.2	Dispositivo empleado para estimar el contenido de humedad del sustrato a partir de la medición de su conductividad eléctrica.
4	Válvula Solenoide	Tiene dos vías utilizadas para regular el flujo de agua en el sistema de riego, asegurando un control confiable del suministro hídrico hacia la maceta.
5	Sensor de nivel metálico	Interruptor fabricado en acero inoxidable, diseñado para detectar la presencia de agua en recipientes.
6	Router TP-Link	Dispositivo de red destinado a gestionar la comunicación TCP/IP entre el PLC y la computadora.

### ***3.4.1 Diagrama P&ID del sistema del sistema de lisimetría***

El sistema de lisimetría implementado se representa mediante un Diagrama de Instrumentación y Tuberías el cual permite describir su arquitectura general del sistema de lisimetría implementado, detallando la disposición de los elementos de instrumentación, control y conducción de agua requeridos para el monitoreo del balance hídrico en macetas. Este diagrama permite comprender de manera comprensible la relación funcional entre los diferentes componentes del sistema, así como la secuencia del proceso vinculada al riego y a la medición de variables físicas de interés.

La instrumentación representada incorpora una electroválvula destinada a regular el suministro de agua hacia el sistema de riego, así como un conjunto de sensores ubicados de manera estratégica. Entre ellos se encuentran celdas de carga, las cuales permiten determinar la masa

total de la maceta mediante la distribución del peso en dos puntos de apoyo, incrementando la estabilidad del sistema y la confiabilidad de las mediciones. Estas mediciones permiten identificar variaciones de peso asociadas al contenido hídrico del sustrato. De forma adicional el sistema cuenta, con un sensor de humedad del suelo que permite estimar el contenido hídrico del sustrato, mientras que el sensor de nivel cumple la función de identificar la acumulación de agua, apoyando el control del sistema hidráulico.

El control automatizado del sistema se concentra en un PLC de la familia Siemens LOGO!, encargado de recibir y procesar las señales procedentes de los sensores, así como de ejecutar las acciones de control previamente definidas. La comunicación entre el PLC y la computadora se establece a través de una conexión cableada que utiliza en el protocolo TCP/IP, asegurando una transmisión de datos estable y confiable para los procesos de visualización y almacenamiento.

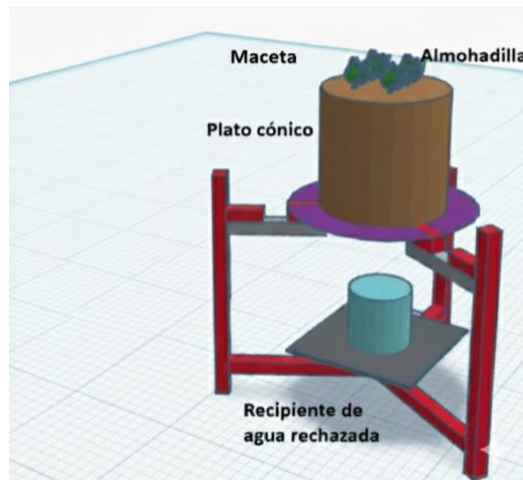
El diagrama P&ID completo se presenta en el Anexo 1, donde se muestra gráficamente la interconexión de los componentes y el flujo del proceso. Asimismo, el detalle de las características técnicas y la función de cada uno de los elementos representados. Se resume en la Tabla 3, facilitando la comprensión del sistema implementado.

**Tabla 4.** Elementos que conforman el diagrama P&ID

<b>Nombre en el P&amp;ID</b>	<b>Nombre del componente</b>
PLC - 01	PLC Siemens LOGO!
S1	Celda de pesaje SIWAREX WL260 SP-S SA (1)
S2	Celda de pesaje SIWAREX WL260 SP-S SA (2)
H-01	Sensor de contenido de humedad del suelo
V-01	Electroválvula
WLS-01	Sensor de nivel tipo flotador
Recipiente	Recipiente de almacenamiento de agua
Aspersor	Aspersor de agua
Alimentación de agua	Toma de agua
PVC	Conductos de PVC
Ethernet	Conexión TCP/IP cableada
PC-01	Computadora

### **3.5 Esquema estructural del sistema de pesaje por lisímetro**

En una fase inicial, el sistema de lisímetros fue concebido a partir de un modelado tridimensional desarrollado en la plataforma de TinkerCAD, tan cómo se ilustra en la Figura 9. Este modelo preliminar en 3D permite comprender de mejor manera la configuración especial y funcional de los elementos principales del sistema, entre los que se incluyen la estructura de soporte de acero, la maceta de cultivo, el plato cónico de soporte y sistema de recolección del agua drenada. Asimismo, esta representación de la construcción física actúa como sirviendo como una herramienta visual fundamental para el desarrollo del sistema destinado a su aplicación en un entorno de investigación.



**Figura 9.** Representación simulada del lisímetro de pesaje

A partir del modelo realizado, se consolidó una solución que articula los aspectos estructurales y funcionales del sistema de lisimetría. Este incluye una estructura metálica principal diseñada para proporcionar estabilidad mecánica al conjunto que soporta la maceta y los elementos de medición, así como una estructura independiente destinada exclusivamente al soporte de la caja eléctrica, la cual permite alojar y proteger los componentes electrónicos de control y adquisición de datos, reduciendo la exposición a la humedad y vibraciones.

Asimismo, el sistema incorpora un plato con geometría cónica diseñado para optimizar la captación del agua percolada, junto con un recipiente destinado al agua rechazada, destinado en zona inferior del. Esta disposición permite una adecuada conducción y acumulación del agua drenada para su supervisión. La maceta actúa como el componente principal del sistema y se encuentra soportada por una estructura de apoyo que integra el cual incorpora celdas de carga que permiten medir con precisión las variaciones de masa asociadas al contenido hídrico del sustrato. Esta disposición garantiza una correcta transmisión de carga hacia los sensores y contribuye a la confiabilidad de las mediciones obtenidas.

El diseño preliminar fue desarrollado inicialmente en TinkerCAD como una etapa conceptual, lo que permitió definir la distribución general de los componentes y evaluar su compatibilidad geométrica. Posteriormente, este modelo fue transferido a SolidWorks, una herramienta de diseño mecánico profesional que permitió llevar a cabo análisis estructurales de mayor detalle, definir tolerancias dimensionales y generar la documentación técnica requerida para el proceso de fabricación. Esta transición facilitó la optimización del diseño mediante la incorporación de

criterios de manufactura y ensamblaje, garantizando la viabilidad constructiva y el funcionamiento adecuado del sistema simulado, lo que permitió desarrollar una solución con aplicación real en la estación de investigación de la sede Cayambe.

### **3.5.1 Análisis Estructural**

El análisis estructural describe una serie de formulaciones matemáticas que permiten predecir las posibles fallas existentes en la estructura, así como garantizar un factor de seguridad óptimo de acuerdo con las condiciones de construcción de la máquina, garantizando su uso prolongado, así como su tiempo de durabilidad ante condiciones extremas.

La carga a la cual estará sometido el trípode es de alrededor de 200 kg basada en la celda de carga ajustada por lo cual para obtener el factor de seguridad se somete a pruebas de la estructura de un material comercial utilizado para la misma, como lo es el acero AISI A36 o acero estructural, en un perfil cuadrangular de 20x2 mm, en una distribución en forma de trípode con unión nodal centralizada, para la colocación de la carga.

#### **3.5.1.1 Análisis de Falla por Esfuerzo Cortante**

La carga aplicada al sistema se determina a partir del peso como se muestra en la Ecuación 1.

$$P = m \times g \quad (1)$$

$$P = 200 \times 9.81$$

$$P = 1962 [N]$$

Posteriormente, el área transversal del perfil cuadrangular se calcula mediante la Ecuación 2, considerando el ancho y el espesor del perfil.

$$A_T = b^2 - (b - 2e)^2 \quad (2)$$

$$A = 144E - 4[m^2]$$

Donde:

- b es el ancho
- t el espesor del perfil cuadrangular

El esfuerzo cortante actuante se determina usando la Ecuación 3, donde se relaciona la carga aplicada con el área resistente.

$$\tau_a = \frac{P}{A_T} \quad (3)$$

$$\tau_a = \frac{2452.5}{144E - 4}$$

$$\tau_a = 17.03 \text{ MPa}$$

$$S_y = \tau\sqrt{3}$$

$$S_y = 250 \text{ [MPa]}$$

$$\tau = 144.25 \text{ [Mpa]}$$

Se designa el criterio de Von Mises para Esfuerzo cortante puro, pues no se puede comparar directamente con su límite de fluencia. El valor obtenido es significativamente menor al esfuerzo cortante admisible del material, lo que se verifica mediante la comparación mostrada en la Ecuación 4.

$$\tau_a < \tau \quad (4)$$

A partir de esta relación, se calcula el factor de seguridad presentado en la Ecuación 5, evidenciando que no existe falla por esfuerzo cortante.

$$FS = \frac{\tau}{\tau_a} \quad (5)$$

$$FS = 8.47$$

Existe un factor de seguridad de 8.47 para fallo por esfuerzo cortante, generando confianza en la resistencia del modelo a la carga máxima permitida del sensor.

Evidenciando que no existe fallo por esfuerzo cortante.

### 3.5.1.2 Análisis de Falla por Pandeo

Se realiza un análisis con condición articulado-articulado para cada pata, con una longitud efectiva de 90. El momento de inercia del perfil se obtiene mediante la Ecuación 6.

$$I = \frac{b^4 - (b - 2e)^4}{12} \quad (6)$$

$$I = 7.7E - 9[m^4]$$

Mientras que la carga crítica de Euler se calcula a partir de la Ecuación 7.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (7)$$

$$P_{cr} = 15199.26[N]$$

Donde:

- E representa el módulo de elasticidad del acero A36, cuyo valor es de 200 GPa
- K es constante de 1 al ser articulado.

Finalmente, el factor de seguridad frente al pandeo se calcula usando la Ecuación 8, demostrando que la estructura es estable y segura bajo cargas aplicadas.

$$FS = \frac{P_{cr}}{P} \quad (8)$$

$$FS = 7.92$$

El factor de seguridad por pandeo es de 7.92, lo cual garantiza que no se presentará falla por pandeo en la estructura. Este valor es 3.96 veces superior al factor de seguridad mínimo establecido como criterio de diseño, correspondiente a FS = 2.

### 3.5.1.3 Componentes de la estructura

El sistema de lisimetría de pesaje está compuesto por diversos componentes estructurales, los cuales han sido diseñados y ajustados para desempeñar funciones específicas dentro del conjunto. En los apartados siguientes se describe cada uno de estos elementos, considerando su diseño, los materiales empleados y sus principales aspectos técnicos relevantes.

### 3.5.1.4 Estructura del Sistema

El diseño y desarrollo del sistema estructural se realizó en el software de simulación SolidWorks, el cual permite representar de manera precisa la geometría del conjunto mediante

el modelo tridimensional. A través de esta herramienta inicialmente, se gestionó el análisis en el comportamiento mecánico de la estructura, considerando las cargas asociadas al peso de la maceta y los componentes que involucran el sistema.

El uso del modelado 3D permite analizar de manera inicial los posibles puntos críticos en la estructura, permitiendo optimizar la disposición de los perfiles y la ubicación de las uniones soldadas. Garantizando un diseño equilibrado con una adecuada distribución de esfuerzos y mayor rigidez del conjunto.

La estructura por utilizarse se presenta en la Figura 10, mientras que el plano correspondiente se incluye en el Anexo 2, donde se aprecia la configuración general del soporte. Adicionalmente, el plano con las dimensiones detalladas y especificaciones de construcción se incluye en el Anexo 1, para posteriormente realizar su fabricación y ensamblaje.



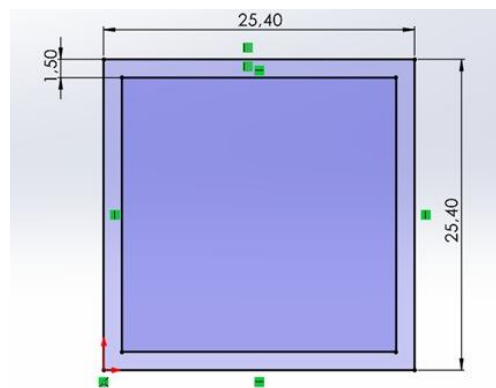
**Figura 10.** Estructura de acero del lisímetro en SolidWorks.

### **3.5.1.5 Material Estructura Base**

La estructura base del sistema se diseñó utilizando tubos cuadrados de acero estructural AISI A36, con una sección de una pulgada y un espesor de pared equivalente a 1,5 mm. Este material

fue seleccionado debido a su amplia disponibilidad en el mercado ecuatoriano, así como por sus adecuadas propiedades mecánicas, que lo hacen apoyo para aplicaciones estructurales de este tipo.

Las dimensiones y propiedades del perfil estructural utilizado se muestran en la Figura 11, donde se presenta el tipo de tubo estándar empleado durante la construcción. La estructura posee un peso total de la estructura es de 3309,73 N, lo cual proporciona la rigidez y estabilidad necesarias para el correcto funcionamiento del sistema, sin afectar su desempeño operativo ni la facilidad del ensamblaje.

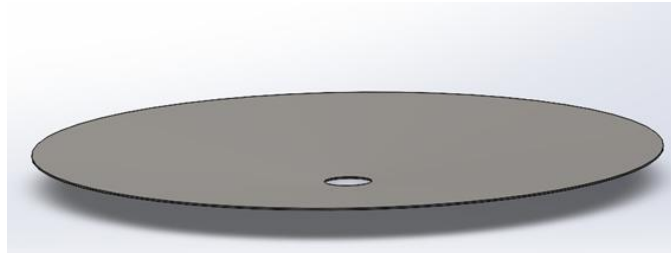


**Figura 11.** Plano dimensional del tubo cuadrado utilizado en la estructura

### 3.5.1.6 Elemento cónico de soporte y drenaje

Dentro del sistema, el plato cónico cumple un rol fundamental como elemento de soporte y conducción del agua drenada. Este componente fue diseñado para ser fabricado en acero inoxidable AISI 304, material elegido por su elevada resistencia a la corrosión y por sus adecuadas propiedades mecánicas, lo que garantiza su durabilidad en condiciones de operación húmedas.

Con un peso de 989.97 N, su geometría ha sido optimizada para dirigir de manera eficiente el agua percolada hacia el sistema de medición. La configuración del plano cónico se presenta en la Figura 12, mientras que el plano correspondiente a sus dimensiones y detalles constructivos se incluyen en el Anexo 3, situado en la sección final del documento.

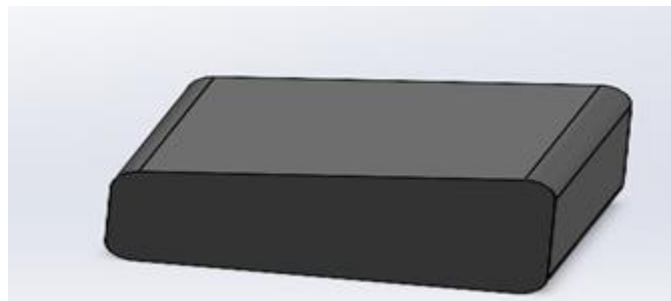


**Figura 12 .** Representación isométrica del plato cónico

### **3.5.1.7 Almohadilla de caucho**

Para el sistema se emplea una almohadilla fabricada en caucho, la cual presenta un nivel de rigidez aproximado del 60 %, permitiendo alcanzar un balance adecuado entre resistencia y flexibilidad durante su uso continuo. Este material, junto con la inclusión de elementos flexibles, contribuye a una absorción eficiente de los esfuerzos y asegura una transmisión uniforme de la carga a lo largo de la operación del sistema.

La configuración de la almohadilla se presenta en la Figura 13, mientras que el plano correspondiente, con sus dimensiones y detalles constructivos, se incluye en el Anexo 4 situado en la sección final del documento.

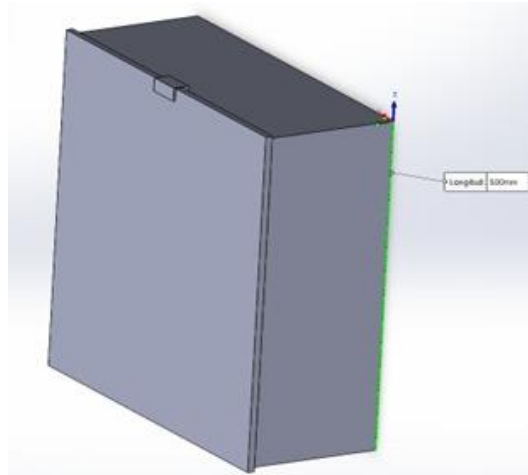


**Figura 13.** Vista isométrica de la almohadilla

### **3.5.1.8 Gabinete eléctrico**

El resguardo de los componentes eléctricos del sistema se efectúa mediante una caja especialmente diseñada para este propósito. Esta estructura posee dimensiones de 500 x 500 x 200 mm, las cuales permiten alojar de forma adecuada y organizada elementos esenciales como el PLC, la luz piloto y el switch de encendido. Asimismo, su configuración interna facilita una correcta disposición de los componentes y promueve una adecuada ventilación, garantizando al mismo tiempo la protección de los dispositivos frente a condiciones ambientales desfavorables.

La caja de protección se ilustra en la Figura 14, mientras que los detalles relacionados con sus dimensiones y características constructivas se presentan en el Anexo 5, ubicado al final del documento.

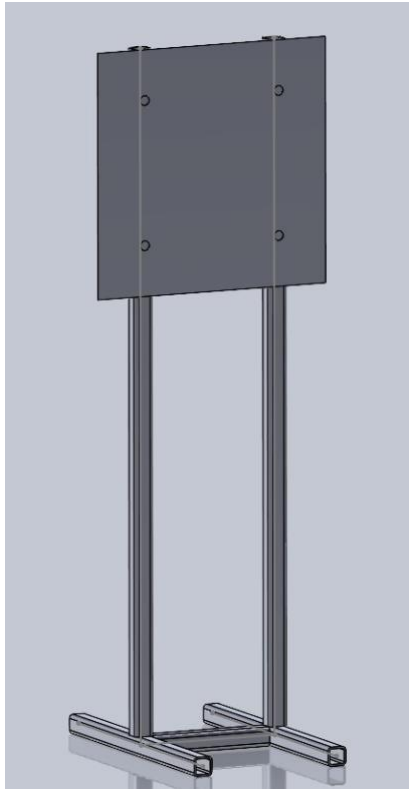


**Figura 14.** Vista isométrica del gabinete eléctrico

### **3.5.1.9 Estructura de Soporte de Caja Eléctrica**

La Figura 15, presenta la estructura independiente utilizada para el soporte de la caja eléctrica del sistema. Esta estructura fue diseñada para proporcionar estabilidad mecánica y una correcta altura del gabinete, permitiendo un acceso seguro a los componentes electrónicos y reduciendo su exposición a humedad, salpicaduras y vibraciones provenientes del sistema principal, y del entorno donde va a estar trabajando.

El diseño está conformado por perfiles metálicos verticales anclados a una base inferior, lo que garantiza rigidez estructural y una correcta distribución de cargas. La placa superior permite la fijación firme de la caja eléctrica. Esta configuración facilita además las labores de instalación, mantenimiento y supervisión de los componentes eléctricos descritos en base a la norma de construcción de tableros eléctricos aplicada en el país.



**Figura 15.** Estructura caja eléctrica

### **3.5.1.10 Plano de conjunto**

En la Figura 16 se muestra el ensamblaje de conjunto del lisímetro, en el cual se puede apreciar la estructura general del sistema y apreciar en el Anexo 7.



**Figura 16.** Plano de conjunto

### 3.5.2 Análisis Estructural a través de Métodos de Simulación

La implementación del sistema de lisímetros requiere la realización de un análisis estructural apoyado en software de simulaciones, orientado a evaluar el comportamiento mecánico del conjunto con base a tres variables fundamentales: la máxima tensión, el coeficiente de seguridad y la máxima deformación. La evaluación de estos parámetros permite verificar la resistencia y estabilidad del modelo, así como asegurar su correcto desempeño y durabilidad durante condiciones de operación a largo plazo.

#### 3.5.2.1 Evaluación de la tensión máxima estructural

Para evaluar la tensión máxima estructural a la que se encuentra sometida la estructura del lisímetro, se realizó un análisis estructural a través del software SolidWorks. Este estudio permitió simular cargas aplicadas sobre la estructura y determinar la distribución de esfuerzos, así como identificar los puntos críticos donde se concentran las mayores tensiones.

Del análisis de tensiones realizado mediante el criterio de falla de Von Mises, presentado en la Figura 17, se desprende que la tensión máxima alcanzada es de 35,36 MPa ( $35\,557\,144\text{ N/m}^2$ ).

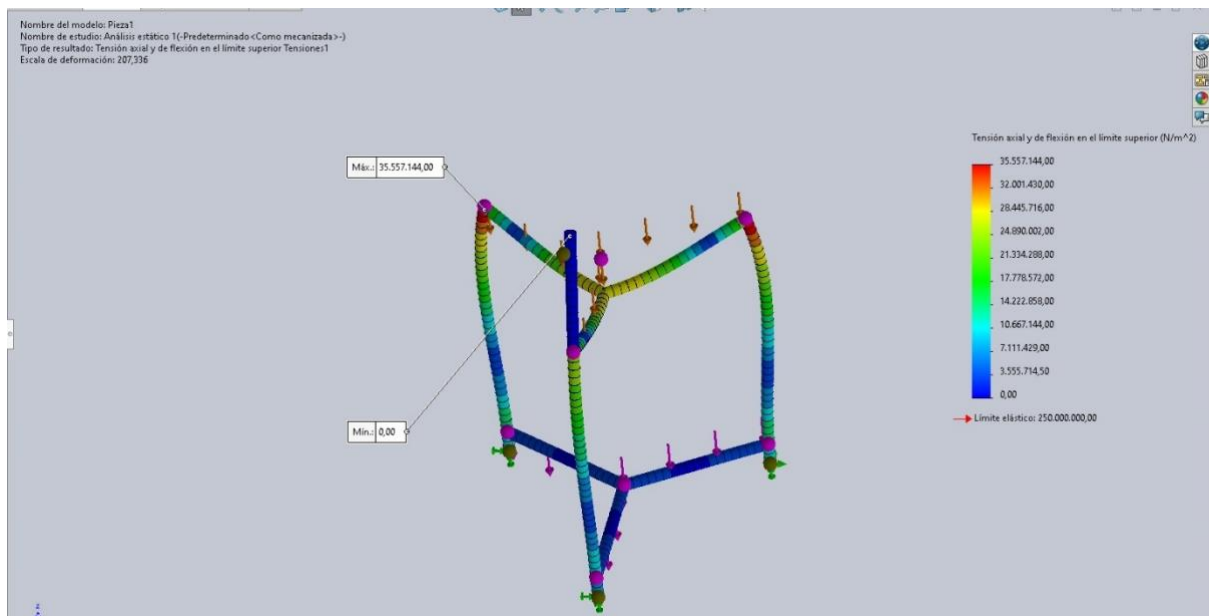


Figura 17. Análisis de tensión máxima

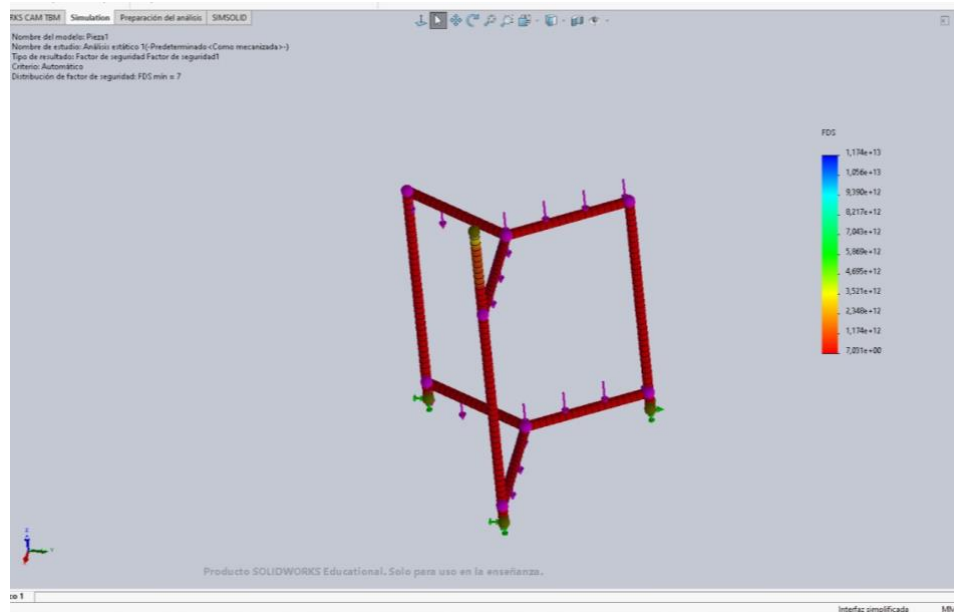
Al comparar este valor con el límite elástico del acero estructural AISI A36, el cual es del 250 MPa ( $250\,000\,000\text{ N/m}^2$ ), se evidencia que la tensión máxima obtenida se encuentra muy por debajo de dicho límite. Este amplio margen de seguridad confirma que la estructura no

experimentará deformaciones permanentes bajo las condiciones normales de operación, garantizado así su integridad mecánica y su desempeño adecuado durante el uso prolongado del sistema.

### 3.5.2.2 Análisis del factor de Seguridad

Con el fin de calcular el factor de seguridad del modelo se define la relación existente entre el esfuerzo correspondiente al límite de fluencia del material y el esfuerzo máximo al que se encuentra sometida la estructura durante su operación como indica la Ecuación 7.

En la Figura 18, se muestra el resultado del análisis del factor de seguridad obtenido mediante simulación en SolidWorks. Los resultados indican un valor mínimo de  $FS = 7$ , lo que evidencia que la estructura posee un nivel de resistencia considerablemente superior al requerido para las sollicitaciones aplicadas en los escenarios operativos analizados.



**Figura 18.** Cálculo de factor de seguridad

Este valor verifica que la estructura es capaz de sostener los esfuerzos generados durante el funcionamiento continuo del sistema, incluyendo el período prolongado asociado al desarrollo del cultivo, sin comprometer su estabilidad estructural. El elevado factor de seguridad obtenido se debe a que el diseño está realizado en base a materiales existentes en el mercado nacional, y como resultado se entrega un modelo sobredimensionado.

Cabe destacar que los perfiles y materiales utilizados para la fabricación de la estructura fueron proporcionados por la Universidad Politécnica Salesiana, lo que condicionó el diseño final y llevó a adoptar una solución estructural más robusta. Esta condición, aunque incrementa el margen de seguridad, también genera un sobredimensionamiento reflejado en los costos de la máquina, pero no conlleva un valor significativo, por lo cual se descarta esta variable.

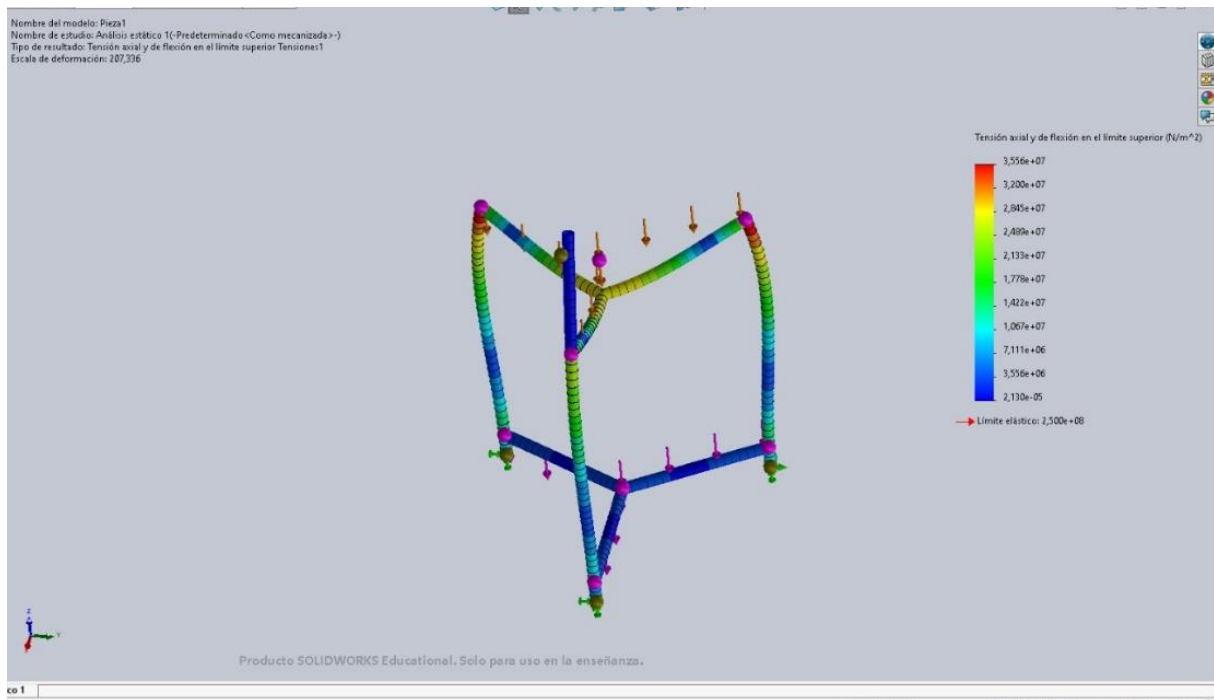
### **3.5.2.3 Análisis de Deformación**

El resultado del análisis de deformación 207.33 presentado en la Figura 19, se obtuvo mediante un análisis estático en el software SolidWorks, aplicado a la estructura del sistema de lisimetría de pesaje. Este análisis permite evaluar el comportamiento del conjunto estructural frente a las cargas operativas consideradas, generando así una certeza en que los desplazamientos no comprometan la estabilidad ni el correcto funcionamiento de la máquina.

Esta respuesta evidencia que la deformación máxima se localiza principalmente en los elementos verticales y en las zonas superiores de la estructura, donde se concentran los efectos de flexión como producto de la carga aplicada. Sin embargo, la magnitud de dicha deformación es reducida y se mantiene dentro de rangos admisibles para estructuras fabricadas en acero estructural A36.

Cabe destacar que la deformación observada en la simulación corresponde a una representación amplificada con fines ilustrativos, por lo que no refleja la deformación real a esta escala. En condiciones reales de operación, el desplazamiento estructural es prácticamente despreciable y no afecta la alineación del sistema ni la precisión de las mediciones efectuadas por celdas de carga.

En conjunto, el análisis de deformación evidencia que la estructura posee una rigidez adecuada para soportar cargas estáticas durante periodos prolongados de funcionamiento, garantizando la integridad estructural y la confiabilidad del sistema de lisímetros a lo largo de su vida útil.



**Figura 19.** Análisis de Deformación

### 3.5.2.4 Diagrama de Conexiones

El esquema presentado en la Figura 20, ilustra el flujo general de operación del sistema eléctrico y de control implementado en el lisímetro de pesaje. Este proceso inicia una vez que la alimentación principal sea de 127 V, para la fuente reguladora de la máquina. Esta tensión es acondicionada mediante una fuente de alimentación Siemens de 24 V, encargada de suministrar un voltaje estable y seguro para los dispositivos de control e instrumentación.

La energía generada por la fuente de 24 V es distribuida a través de un rack de distribución de cuatro líneas, el cual permite organizar y proteger las conexiones eléctricas, permitiendo así la separación de circuitos de potencia y de control, garantizando que el modelo no presente ruido al momento de transferir los datos a través del cable de red RJ-45. De forma paralela los sensores instalados en el lisímetro se conectan al sistema de control, proporcionando las señales necesarias para el monitoreo del peso y las condiciones del suelo. Estas señales son conducidas hacia el controlador PLC Siemens LOGO, el cual actúa como el núcleo del sistema de automatización.

El PLC recibe la información proveniente de los sensores y gestiona las señales de control con una etapa de instrumentación y acondicionamiento de señal. La comunicación entre el PLC y

el sistema de supervisión se lleva a cabo mediante la conexión TCP/IP, lo que permite una transferencia de datos estable y confiable hacia la computadora de monitoreo.

Finalmente, la información procesada es visualizada a través de un Dashboard desarrollado en Node-RED, donde el usuario puede supervisar en tiempo real el estado del sistema, analizar los datos obtenidos y realizar un seguimiento continuo del funcionamiento del lisímetro. Esta arquitectura asegura una integración eficiente entre la alimentación eléctrica, el control automático y la supervisión digital del sistema.

### 3.6 Análisis Comparativo

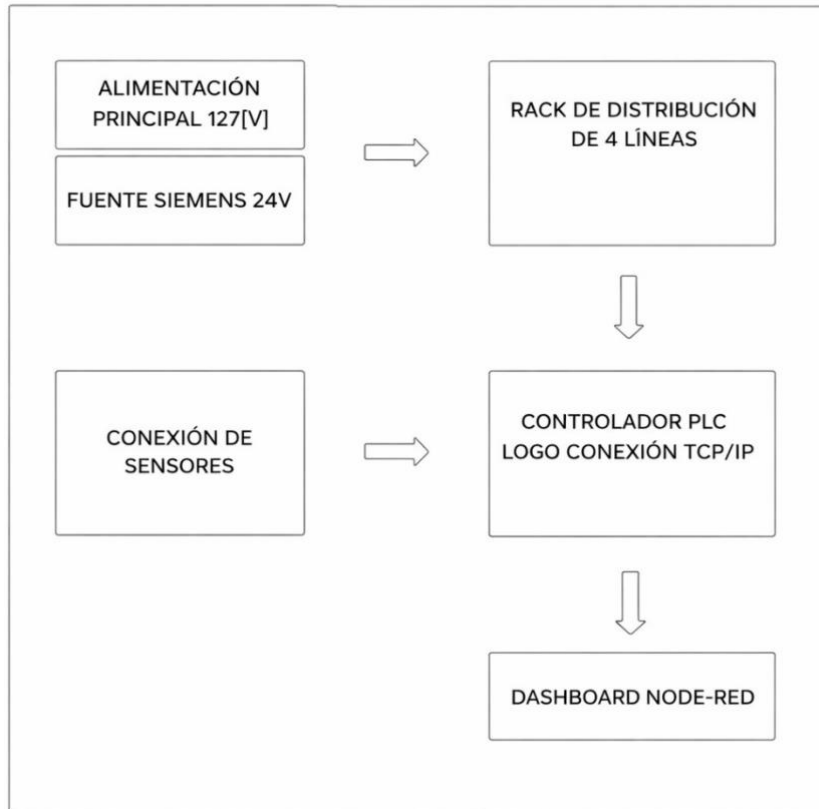
Una vez realizado el análisis matemático y en análisis a través de software de simulación, se pudo llegar a la siguiente comparación expresada en la siguiente tabla:

**Tabla 5.** Análisis matemático comparativo de parte de simulación vs real

<b>Factor de seguridad</b>	<b>Análisis matemático</b>	<b>Análisis Simulado</b>
Por Pandeo	7.9	7.05
Por esfuerzo Cortante	8.91	8.29

Con los valores obtenidos dentro de la siguiente tabla se procede a hacer un análisis del error existente en ambos casos de falla. Al analizar el factor de seguridad por Pandeo se puede apreciar que existe un error del 9.6% entre el valor calculado y el valor simulado evidenciando la confianza existente en los valores calculados, para su posterior implementación.

La falla por esfuerzo cortante sugiere un rango más alto de factor de seguridad puesto que el material usado como soporte base es un acero comercial el cual su venta es por valores nominales en este caso de 20×2 mm para el tubo cuadrangular, justificando así el sobredimensionamiento existente en su análisis. Posteriormente en resultado a los valores comparativos entre valores calculados y simulados se obtuvo un error del 6.95% lo cual verifica la validez del factor de seguridad ante el fallo por esfuerzo cortante.



**Figura 20.** Esquemático de diagrama de conexiones.

# CAPÍTULO IV

## PRUEBAS Y RESULTADOS

### 4.1 Lectura e Instrumentación de Datos

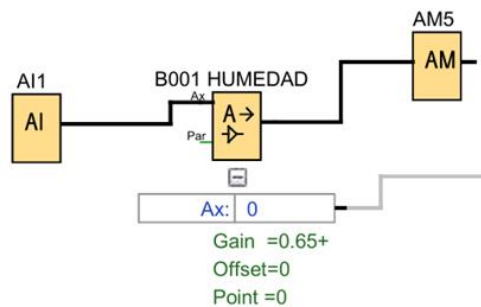
Una vez implementada la instrumentación correspondiente de los sensores, es necesario realizar un ajuste digital dentro del programa de LogoSoft como se describe a continuación:

#### 4.1.1 Sensor de Humedad

En esta etapa se describe la adquisición inicial de datos desde la planta al PLC a través del protocolo de comunicación TCP/IP.

##### 4.1.1.1 Etapa 1

En la Figura 21 se describe la entrada inicial de datos:



**Figura 21.**Instrumentación Sensor de Humedad

A continuación, se describe la lectura de la entrada para el sensor de humedad como una entrada analógica para ser procesada por un amplificador analógico para delimitar los límites de medición en este caso el sensor de humedad se alimenta con un voltaje de 5 V y entrega una salida para un valor máximo de  $V_{out}$  3.7 V para una humedad del 0% y un valor de 0.9 V para la humedad del 100% por lo cual el rango de medida será de 90 a 370.

##### 4.1.1.2 Etapa 2

La Figura 22 indica el proceso de instrumentación descrita a continuación:

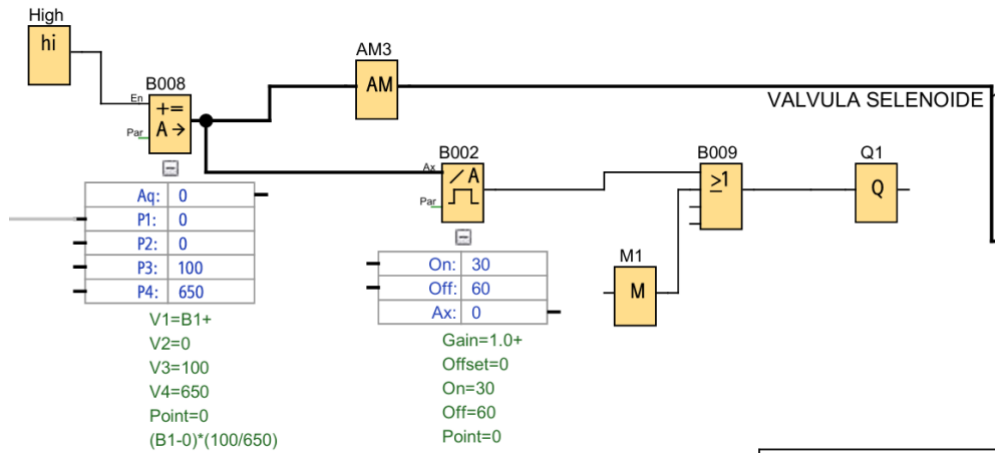


Figura 22. Instrumentación post medida

En esta etapa se toma el valor de salida del amplificador, y se pasa por una etapa de instrumentación digital a través de instrumentación aritmética y se formula en la Ecuación 9:

$$V_{out} = (V_{in} - V_{offset}) \left( \frac{Resolucion}{V_{alcance} - V_{offset}} \right) \quad (9)$$

Entregando así un valor entero que se guarda en una marca analógica, para la importación a la pasarela que se integra posteriormente con Node-Red y la visualización del valor de medida en el Dashboard.

#### 4.1.2 Sensor de Peso

##### 4.1.2.1 Etapa 1

La Figura 23, describe la obtención de variable de entrada analógica.

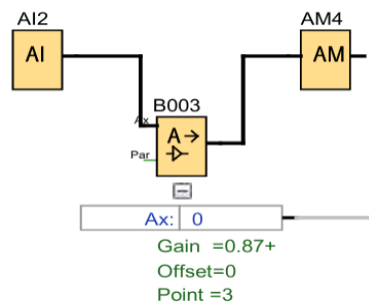
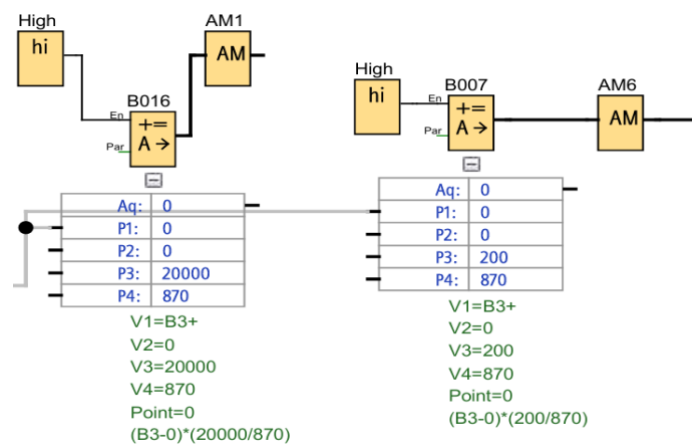


Figura 23. Medición Sensor de Peso

Se genero una recepción de los datos a través de una entrada analógica AI2 para su posterior procesamiento en un amplificador analógico (B003) delimitando el rango de mediad del sensor; una vez realizado este proceso se procede a realizar una serie de operaciones aritméticas descrito a continuación:

#### 4.1.2.2 Etapa 2

En la Figura 24, se describe la etapa de instrumentación, una vez obtenida la adquisición de datos:



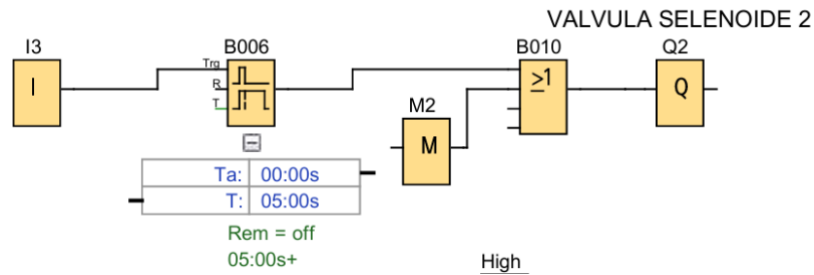
**Figura 24.** Instrumentación Sensor de Peso

Dentro de esta etapa se generan dos operaciones aritméticas distintas debido a que los datos entregados de salida por el PLC Logo son números enteros, y no permite evidenciar el daño de medida en decimales por lo cual, se exportan con un máximo de medida para procesarlos posteriormente en Node-Red.

Este proceso se realizará para los dos sensores de peso, con una variación en la capacidad de carga de los sensores, así como su instrumentación en la toma de medidas.

#### 4.1.3 Sensor de Flotabilidad

El principio de operación de la etapa de drenaje se presenta en la Figura 25.



**Figura 25.**Funcionamiento Etapa de Drenado

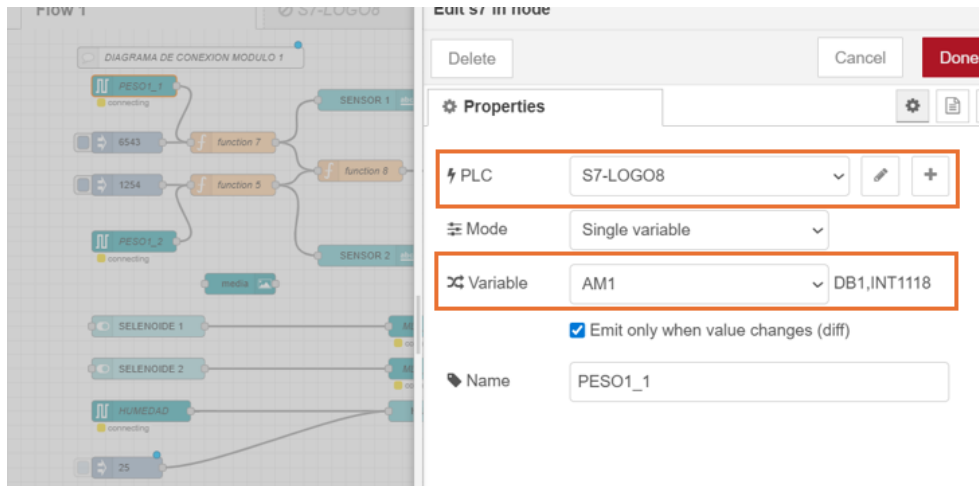
Este sensor a diferencia de los dos anteriores no describe una salida analógica por lo cual al ser un sensor Plug & Play se considera una entrada digital, en la cual, al activarse la entrada, generara un retraso en la conexión para el actuador una vez que el sensor detecte que el recipiente este lleno. Se añade una marca de ingreso como una entrada manual para la apertura de la válvula solenoide, en caso de ser requerido.

Una vez realizado todo este proceso de obtención de datos se agregó de manera adicional una condición en la cual, si los sensores no detectan el peso configurado en los límites de trabajo, genera una alerta a través de una luz piloto de color rojo.

## 4.2 Diseño del Dashboard y Obtención de Datos de LogoSoft

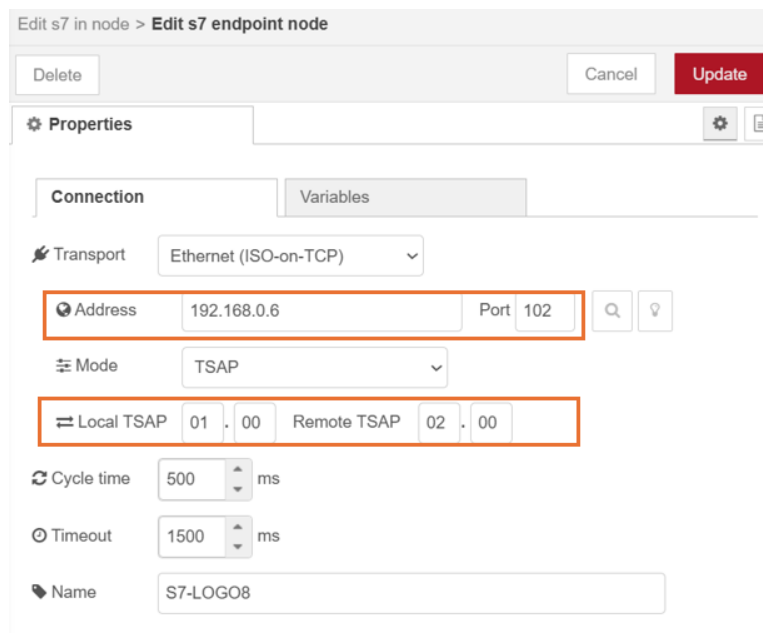
### 4.2.1 Obtención de Datos de LogoSoft

Para inicializar el proceso de obtención de datos desde LogoSoft es necesario generar una conexión TCP/IP a través de un cable de red RJ45. Se realiza una prueba de comunicación y se inscribela dirección IP del PLC dentro de los parámetros de nodo de entrada en Node-Red como describe la Figura 26 a continuación:



**Figura 26.**Nodo de Funciones

Una vez generado este proceso se da un registro de marca de la cual se va a obtener el dato, así como el tipo de PLC con el que se trabaje, en este caso PLC Logo, tal como se muestra en la Figura 27.

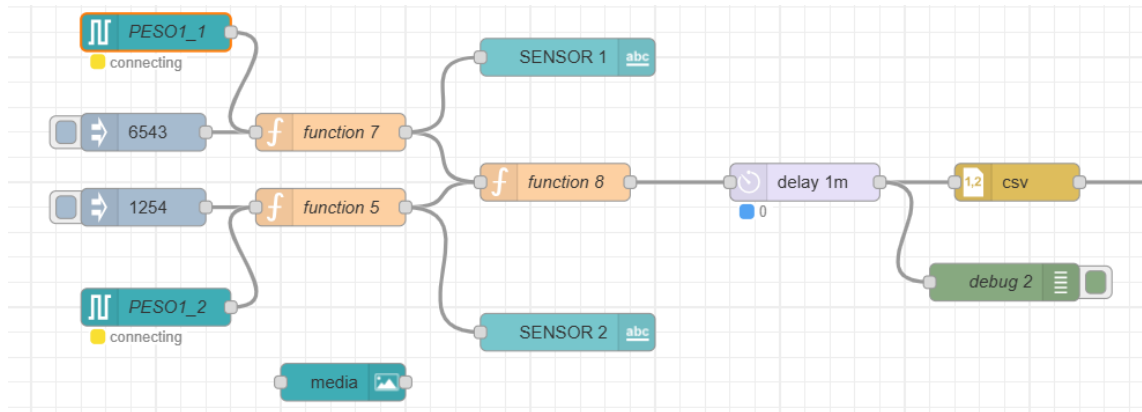


**Figura 27.**Nodo de procesamiento de funciones

Se registra la dirección IP asignada al PLC, así como el local TSAP y Remote TSAP que se describe de manera contraria en el LogoSoft, este proceso genera la conexión entre el PLC y Node-Red.

## 4.2.2 Diagrama de Funciones

La Figura 28, describe el diagrama a utilizar una vez obtenidos los datos del PLC.



**Figura 28.**Diagrama de Funciones Node-Red

Dentro del diagrama de funciones el valor que se evidenciara en el Dashboard, ya evidenciado en peso con valores flotantes, por lo cual es necesario generar una función que realice este proceso con lo cual se describe a continuación:

### 4.2.2.1 Función 1

La Figura 29 describe el código implementado:

```

Edit function node
Delete Cancel Done
Properties
Name function 7
Setup On Start On Message On Stop
1 // Convertir valor del LOGO
2 let raw = Number(msg.payload);
3 let peso1 = (raw / 1000).toFixed(2);
4 flow.set("galgal",peso1);
5
6 // Guardamos en msg.valor1 para usarla después
7 msg.payload = peso1;
8
9 return msg;

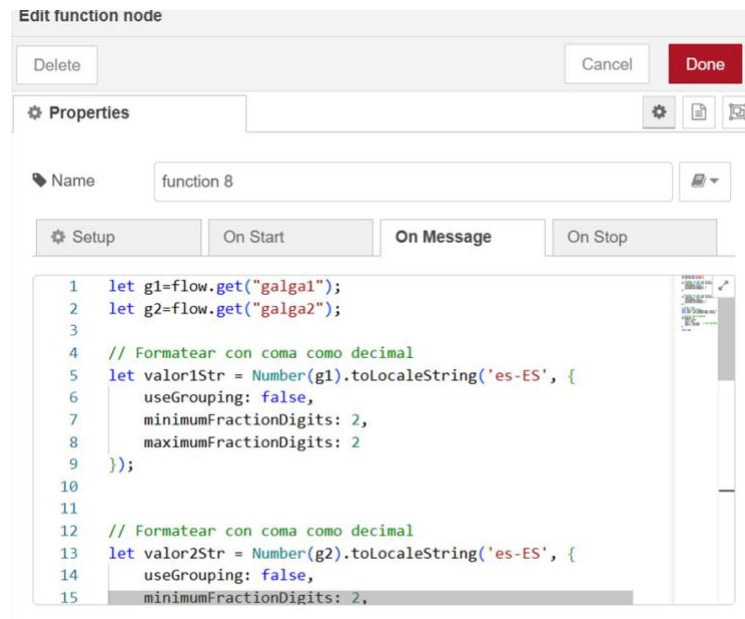
```

**Figura 29.** Ecuaciones de Proceso de Datos

Dentro de este cuadro de función se describe el código para convertir el dato enviado del PLC a flotante y a su vez guardarlo para poderse utilizar en una función incluida en el mismo ramal con el comando Flow.set("nombre", valor ingresado del PLC).

#### 4.2.2.2 Función 2

Descripción de la Figura 30, una vez procesada la información en flotante.



```
1 let g1=flow.get("galga1");
2 let g2=flow.get("galga2");
3
4 // Formatear con coma como decimal
5 let valor1Str = Number(g1).toLocaleString('es-ES', {
6   useGrouping: false,
7   minimumFractionDigits: 2,
8   maximumFractionDigits: 2
9 });
10
11
12 // Formatear con coma como decimal
13 let valor2Str = Number(g2).toLocaleString('es-ES', {
14   useGrouping: false,
15   minimumFractionDigits: 2,
```

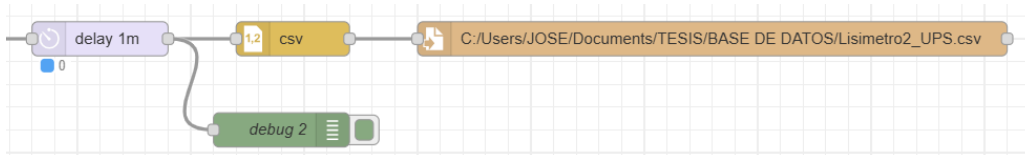
Figura 30. Procesamiento de los Datos

En la imagen se generó la obtención de las dos señales enviadas por el PLC para cada sensor de peso de la planta, almacenadas con el comando “Flow.set”, y generadas con el comando “Flow.get” dentro del nuevo bloque de funciones en una variable. Una vez realizado todo este proceso se verifica que el valor entregado sea un número generado con el comando “number” y se delimita el número en decimales.

La fecha y hora va incluida dentro de la variable guardada, así que debe ir en el mismo payload, para su posterior procesamiento y generación en el archivo CSV.

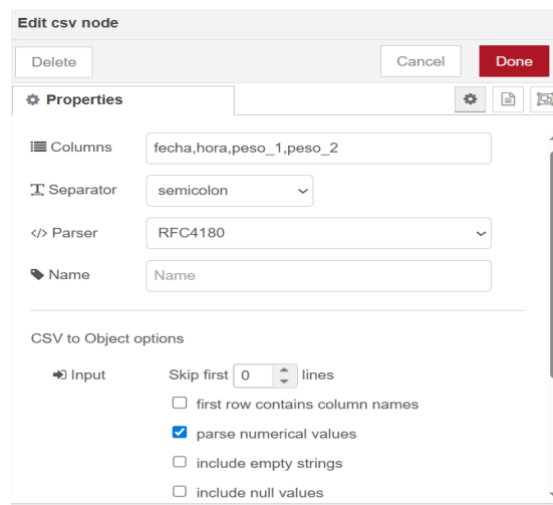
#### 4.2.2.3 Importar Datos de Node-Red a CSV

La Figura 31 describe la configuración de bloques para importar los datos obtenidos a un archivo CSV.



**Figura 31.** Payload a CSV

Una vez abierto el bloque de código del CSV se describe el proceso a continuación mostrado en la Figura 32:

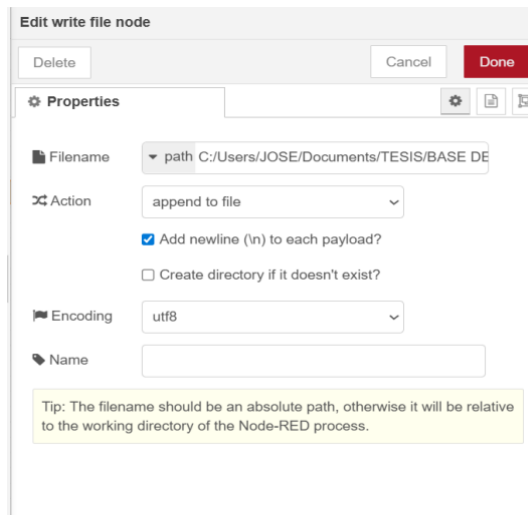


**Figura 32.** Configuración CSV

Se generan los valores a importar, el separador de columnas y el objetivo de la hoja de CSV en la que se importan los datos, así como la cabecera en cada ejecución y el tipo de software en el que se realizara la apertura del archivo.

#### 4.2.2.4 Escritura del Archivo CSV en el PC

La Figura 33 se describe como el cuadro de dialogo del nodo de función:



**Figura 33.** Escritura CSV dentro del PC

Generar un archivo dentro del directorio del PC en el cual se esté trabajando, únicamente se da el proceso debido a que Node-Red con el trabajado dentro de un Localhost se puede guardar automáticamente, siendo el caso que la conexión sea online, así como describir un archivo tipo HTML en el cual se generara un link para la descarga.

### 4.3 Evidencia de Variables Configuradas en el Dashboard

La Figura 34, representa la interfaz de usuario descrita a continuación:



**Figura 34.** Variables en el Dashboard

En el Dashboard generado dentro de una conexión de red local en el cual se evidencia los valores a temperatura, así como el peso actual de cada celda de carga, adicionalmente presenta dos activadores manuales que permitan el encendido de las válvulas solenoides.

#### 4.4 Análisis de Datos del Archivo CSV

El archivo CSV exportado de Node-Red genera una tabla de datos con los siguientes valores como indica la Figura 35:

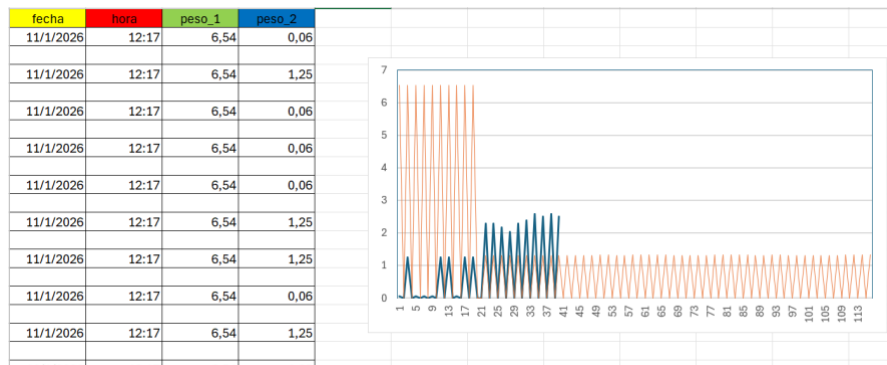


Figura 35. Datos Exportados de Node-Red

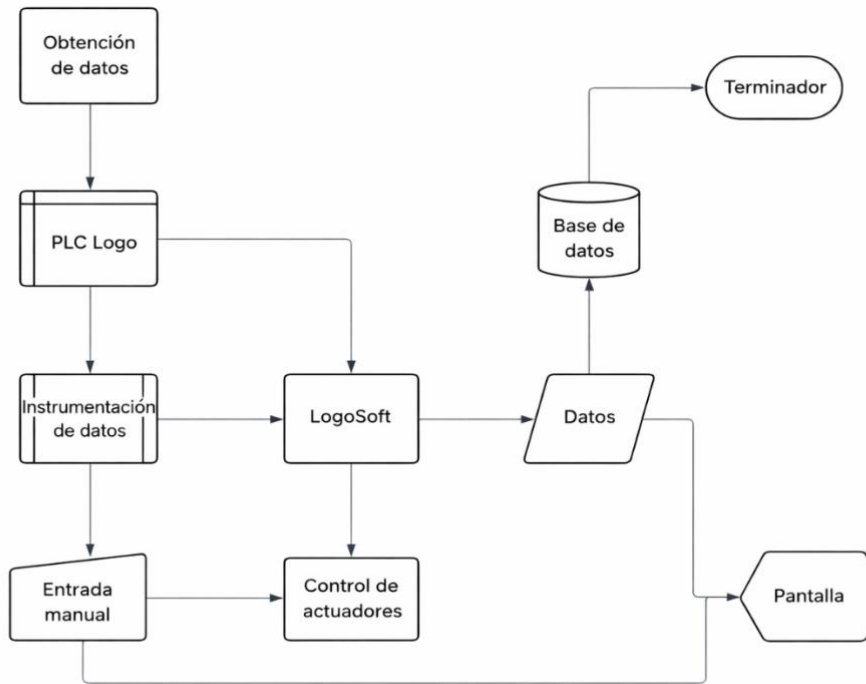
La fecha y hora descrita indica los parámetros configurados de la importación de datos del PLC y pueden variar de acuerdo con los requerimientos del usuario, en este caso se llevó a cabo la recopilación de medidas aleatorias debido a que este modelo será usado para la medición del peso de maceteros con los productos que ellos requieran analizar, y el tiempo en el cual consideren se realice la toma de medidas para así evidenciar el consumo real de agua en sus sembríos, así como generar la obtención del recurso.

La decisión de trabajar con esta pasarela de datos llamada Node-Red se dio debido a que este proyecto en el cual se pretende seguir innovando e implementando más modelos de lisímetros, por lo cual se dejó la apertura en la configuración, para añadirse a puertas de enlace realizadas con parámetros de IOT a través de un protocolo de comunicación MQTT.

#### 4.5 Decisión Final Para Construcción Del Trípode Lisímetros

Dentro del modelo inicial se contemplaba una maquina en forma de trípode para obtener una carga distribuida en cada uno de los brazos, con un sensor en cada uno de ellos. Pero por motivos de un desajuste en la adquisición de los componentes financiados por la Universidad Politécnica Salesiana se redujo a trabajar con una sola celda de carga, por lo cual el peso se puntualizó. Tomando como necesario centralizarlos en una unión para colocar como soporte la celda de carga y el plato medidor.

Generando una unión más estable ya que el factor de seguridad de 4 aumenta a 7 por la unión de los brazos, pero disminuye la eficiencia en la medición, puesto que al ser un solo sensor no se puede generar una correcta distribución de peso, ni disminuir la resolución de la medida. Para hacer un recuento de la ejecución del proceso se evidencia el siguiente diagrama de flujo indicado en la Figura 36:



**Figura 36.**Ejecución del Proceso

#### 4.6 Evidencia de la Implementación de la Planta

La Figura 37 muestra la planta implementada en su configuración final, donde se puede apreciar la estructura física del sistema junto con los elementos principales que permiten su funcionamiento. En esta etapa se integraron los componentes mecánicos y eléctricos sobre la base soporte, cuidando la correcta distribución del espacio.



**Figura 37.**Planta Implementada

En la Figura 38 se presenta el tablero de control desarrollado para la planta, el cual alberga los dispositivos electrónicos necesarios para su implementación. En su interior se pueden identificar los elementos de protección, alimentación y control.



**Figura 38.**Tablero de Control Planta

#### 4.7 Normativa Para el Diseño del tablero de Control

Dentro de los parámetros vigentes para diseño y construcción de tableros de control se aplicó la normativa vigente actualmente en el país desde el 2013 con el nombre de “NTE INEN-UNE 61439-1” para tableros de baja tensión en distribución, garantizando que la distribución de potencia y control otorgue principalmente seguridad, evitar interferencias y permitir el mantenimiento de forma adecuada, puesto que al generar un sistema de potencia junto a un sistema de control se presenta ruido generado por los armónicos producidos, por lo cual es necesario generar dos etapas aisladas la una de la otra tal como se presenta en la Figura 39 a continuación:

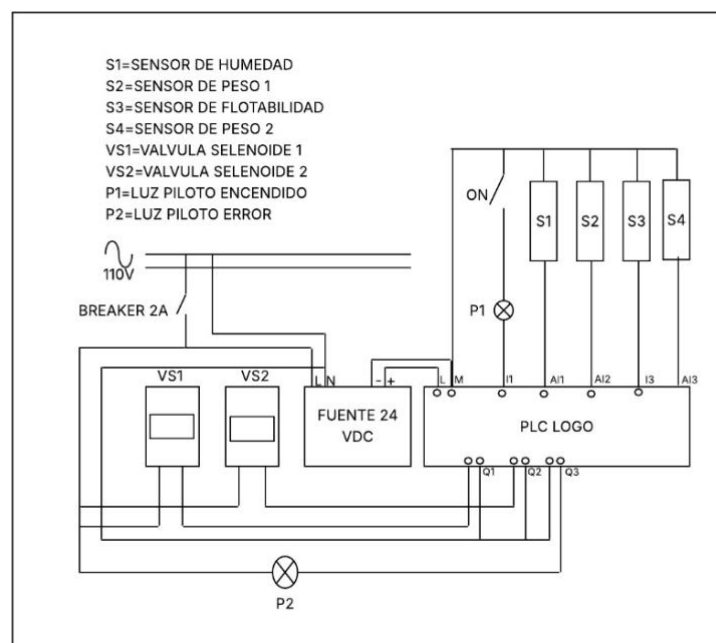


Figura 39. Esquema de distribución eléctrica

Así como la colocación de interruptores generales, una correcta distribución a partir de canaletas, separación física, protección contra contacto accidental y la distribución de una distancia mínima adecuada por el diseñador.

## Conclusiones y Recomendaciones

### Conclusiones

- Se implementó el funcionamiento entre la estructura mecánica y los componentes electrónicos con una correcta disposición de sensores, desarrollando un modelo matemático de escalamiento que permitió acondicionar las señales de entrada proveniente de los sensores no industriales, como peso entregando un voltaje de entrada de 2.4 V por lo cual fue necesario generar una etapa de amplificación, e instrumentación digital para obtener un rango de medida escalonado entre 0 a 200 kg para la galga principal y 0 a 10 kg para la celda de carga del desfogue, dicho proceso es necesario, debido a que los rangos nominales no son industriales de medida de 0 a 10 V , por lo cual para garantizar el monitoreo de manera más confiable es necesario realizar este proceso de instrumentación con los rangos de medida obtenidos por estos componentes.
- La integración efectiva de los componentes mecatrónicos, empleando el uso de amplificadores digitales configurados en LogoSoft, permitieron mejorar la resolución de las señales analógicas y facilitar su posterior escalamiento a valores físicos representativos. Como resultado, se establecieron rangos operativos de 0 a 350 para el sensor de humedad y hasta 1350 para los sensores de peso, considerando que la resolución máxima del PLC Logo es de 1000 unidades lo cual permite una interpretación consistente de los datos adquiridos con una precisión de 200 g para el sensor de peso de 200 kg y de 10 g para el de 10 kg. Posteriormente con la adquisición de estos datos, se genera la supervisión de las variables censadas y el control de actuadores con el uso de Node-RED como plataforma intermedia e interfaz de monitoreo en red local, generando una base para la integración de protocolos en sistemas con conceptos de industria 4.0 y tecnologías de internet de las cosas (IoT). El uso de esta pasarela crea una apertura para la gestión y almacenamiento eficiente de la información obtenida desde el PLC hacia entornos de red y nube.
- Dentro de la validación experimental mediante pruebas con lisímetros y macetas reales, se determinó que el empleo de sensores didácticos introduce un error medio aproximado del 24% atribuible principalmente a la falta de entrega de voltajes nominales y a la limitada precisión intrínseca de los sensores. No obstante, mediante el uso de amplificación analógica y escalamientos digitales, se logró mejorar la estabilidad y repetibilidad de las mediciones, aunque sin garantizar una exactitud absoluta en

condiciones reales prolongadas en operación. La instrumentación de los sensores como la celda de carga se realiza mediante un amplificador AD620 alimentado a 8 V, obteniendo una señal de salida ajustada según la relación de  $V_{out}$  con un offset de 1.3, lo cual permite una lectura adecuada por el PLC. El sensor de temperatura HD-38 evidencio un voltaje de salida de 4.2 V para un valor máximo de humedad y un 0.8 V en condiciones libre de humedad, generando una integración efectiva dentro del sistema de monitoreo.

## Recomendaciones

- Se recomienda que, en futuras implementaciones del sistema, se utilicen sensores de tipo industrial con señales de salida normalizadas, tales como 0-10V o 4-20 mA, con el objetivo de disminuir el nivel de error de medición de las variables asociadas al peso, humedad y temperatura, así mejorando la confiabilidad general del sistema de monitoreo.
- Se sugiere optimizar el acondicionamiento de las señales analógicas, mediante el uso de amplificadores de instrumentación con mayor estabilidad y filtros desarrollados para el uso específico del PLC Logo y no amplificadores genéricos como ADS60, que permitan disminuir el ruido eléctrico y las perturbaciones presentes en las señales adquiridas por el PLC.
- La comunicación entre el PLC y las plataformas de gestión de datos, se recomienda ampliar la conectividad hacia servicios en la nube mediante protocolos seguros, incorporando mecanismos de autenticación, cifrado de información y control de acceso, con el propósito de asegurar la integridad, la disponibilidad y confidencialidad de la información, incorporando funcionalidades como alarmas automáticas, registros históricos de datos y análisis estadístico, lo cual permite una evaluación más precisa del desempeño del sistema facilitando la toma de decisiones en condiciones críticas.
- Se recomienda generar una calibración de unidades de medición con pesas patrones, y sensores ajustables al rango de medida necesaria, puesto que en este caso puntual se utilizó una celda de carga de 200 kg para una medida de 2 y la precisión mínima obtenida es de 200 g por lo cual los valores obtenidos dentro del peso inicial serán lejanos para el análisis posterior.

## Referencias

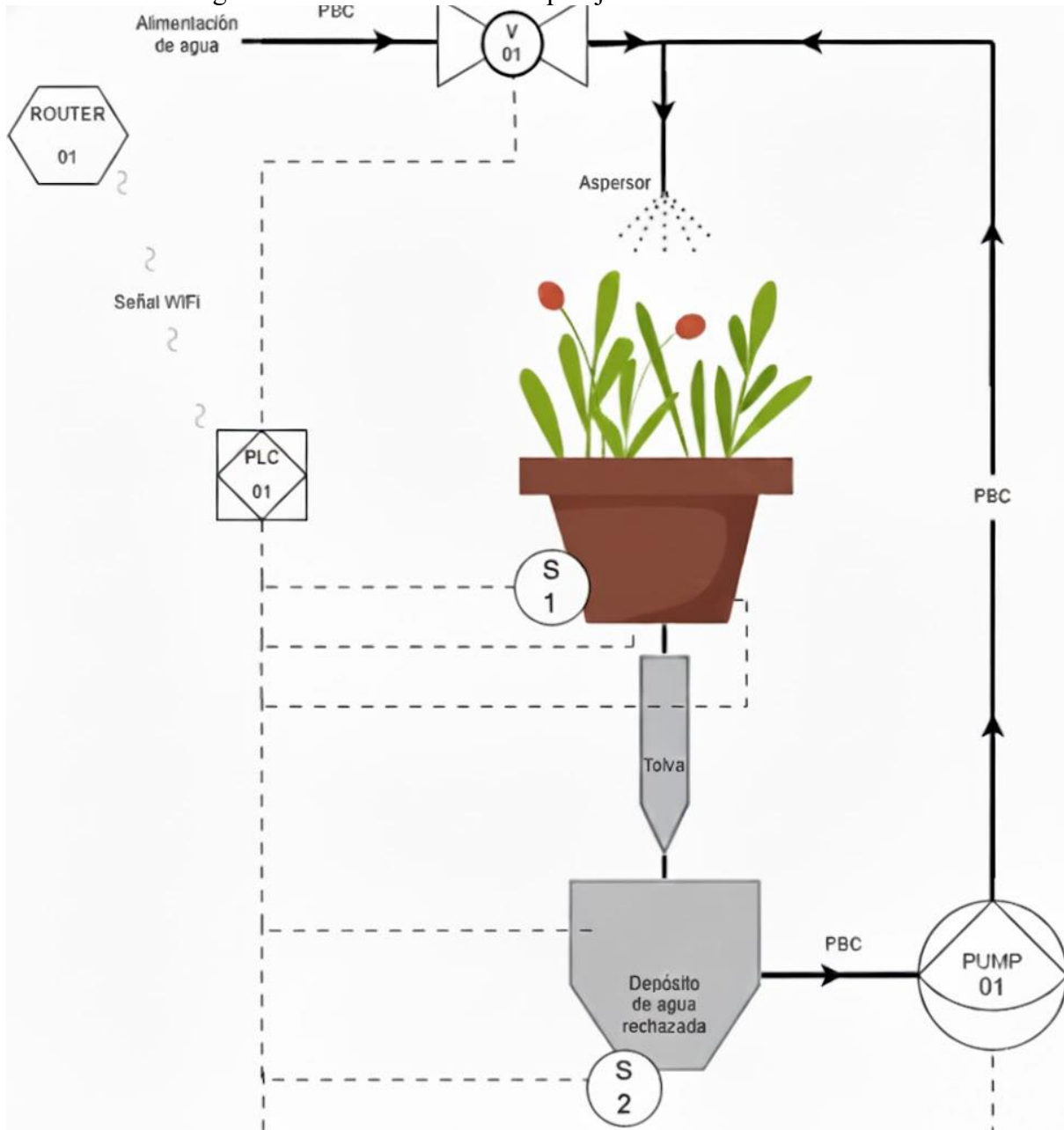
- [1] P. Kumar Yadav and F. Cassel Sharma, “Soil Moisture Sensor-Based Irrigation Scheduling to Optimize Water Use Efficiency in Vegetables,” 2017.
- [2] I. A. Lakhiar *et al.*, “A Review of Precision Irrigation Water-Saving Technology under Changing Climate for Enhancing Water Use Efficiency, Crop Yield, and Environmental Footprints,” Jul. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/agriculture14071141.
- [3] A. Chebil, A. Souissi, A. Frija, and T. Stambouli, “Estimation of the economic loss due to irrigation water use inefficiency in Tunisia,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, no. 11, pp. 11261–11268, Apr. 2019, doi: 10.1007/s11356-019-04566-8.
- [4] R. Nolz, “A review on the quantification of soil water balance components as a basis for agricultural water management with a focus on weighing lysimeters and soil water sensors,” Sep. 01, 2016. doi: 10.1515/boku-2016-0012.
- [5] B. F. Lyles, B. D. Sion, D. Page, J. B. Crews, E. V. McDonald, and M. B. Hausner, “Closing the Water Balance with a Precision Small-Scale Field Lysimeter,” *Sensors*, vol. 24, no. 7, Apr. 2024, doi: 10.3390/s24072039.
- [6] X. Lyu, Y. Zhu, C. Zhang, X. Hu, and N. A. Adams, “Modeling of cavitation bubble cloud with discrete lagrangian tracking,” *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 19, Oct. 2021, doi: 10.3390/w13192684.
- [7] L. Molina, E. Neira Huamán, L. Ramos Fernández, and L. Ramón Razuri Ramírez, “Coeficiente del cultivo (Kc) del arroz a partir de lisímetro de drenaje en Coefficient of cropping (Kc) of rice from drain lysimeter in The Molina, Lima-Perú,” 2020.
- [8] A. Sagar *et al.*, “Development of Smart Weighing Lysimeter for Measuring Evapotranspiration and Developing Crop Coefficient for Greenhouse Chrysanthemum,” *Sensors*, vol. 22, no. 16, Aug. 2022, doi: 10.3390/s22166239.
- [9] R. Kuunya, M. M. A. Osman, B. Ssemugenze, C. Gumisiriya, and P. Ragán, “Soil moisture sensors for sustainable water management in field crop production: A review of advances and application challenges,” *Acta Agraria Debreceniensis*, no. 2, pp. 41–54, Dec. 2025, doi: 10.34101/actaagrar/2/16097.
- [10] D. Loconsole, M. Elia, G. Conversa, B. De Lucia, G. Cristiano, and A. Elia, “Soil Moisture Sensing Technologies: Principles, Applications, and Challenges in Agriculture,” Dec. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/agronomy15122788.
- [11] F. Hamouda, À. Puig-Sirera, L. Bonzi, D. Remorini, R. Massai, and G. Rallo, “Design and validation of a soil moisture-based wireless sensors network for the smart irrigation of a pear orchard,” *Agric. Water Manag.*, vol. 305, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.agwat.2024.109138.
- [12] J. K. Adesodun, S. J. Akinsete, and F. K. Salako, “Soil Physics.” [Online]. Available: <http://www.unaab.edu.ng>

- [13] R. G. A. P. P. R. L.-U. D. R. M. S. A. K. M. S. Luis S. Pereira, *Crop evapotranspiration*. FAO, 2025. doi: 10.4060/cd6621en.
- [14] “Physical Properties-Exercise P06b Soil water content: gravimetric method 1 Reference poster n. 4.”
- [15] D. K. Fisher, “Simple weighing lysimeters for measuring evapotranspiration and developing crop coefficients,” *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 5, no. 3, 2012, doi: 10.3965/j.ijabe.20120503.004.
- [16] by J. Šimůnek, M. Šejna, H. Saito, M. Sakai, and M. Th van Genuchten, “The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL SCIENCES UNIVERSITY OF CALIFORNIA RIVERSIDE, CALIFORNIA,” 2013.
- [17] D. R. Bryla, T. J. Trout, and J. E. Ayars, “Weighing Lysimeters for Developing Crop Coefficients and Efficient Irrigation Practices for Vegetable Crops,” 2010. [Online]. Available: <http://www.cimis.water.ca.gov>
- [18] Steve Evett, “Soil Water Sensors for Agriculture-Theory and Issues NRCS Soil Water Sensor Seminar Series,” 2016. [Online]. Available: <http://www.merimis.org/index.html>
- [19] S. S. Anapalli *et al.*, “Simulation of crop evapotranspiration and crop coefficients with data in weighing lysimeters,” *Agric. Water Manag.*, vol. 177, pp. 274–283, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.agwat.2016.08.009.
- [20] K. Morillo, “DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE LISÍMETROS PARA MACETAS EN LA ESTACIÓN DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN DE CIENCIAS DE LA VIDA Y EL DESARROLLO SOSTENIBLE,” 2025.
- [21] R. G. Allen, L. S. Pereira, and D. Raes, “Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements),” 1998.
- [22] G. Piccinni, A. Schneider, T. Howell, M. Jett, D. Dusek, and V. Bavel, “Aase and Siddoway,” Soileau and Hauck, 2012.
- [23] Siemens, “SIWAREX WL260 SP-S SA Load Cell,” <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/process-instrumentation/weighing-systems/load-cells/siwarex-wl260.html>.
- [24] I. Muller, R. Machado De Brito, C. E. Pereira, and V. Brusamarello, “Title Byline Load Cells in Force Sensing Analysis-Theory and a Novel Application A Ring-type Load Cell,” 2010.
- [25] A. Kheirallaa, A. Eltigani, M. Mohamend, Ahmed Osman Elzaki, and H. Mohamend, “Desig and Development and Calibration ofan On-board Weighing System for an Idustrial Wheel Loader,” 2012.
- [26] HBM, “SP4M single point load cell – Technical data. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.”

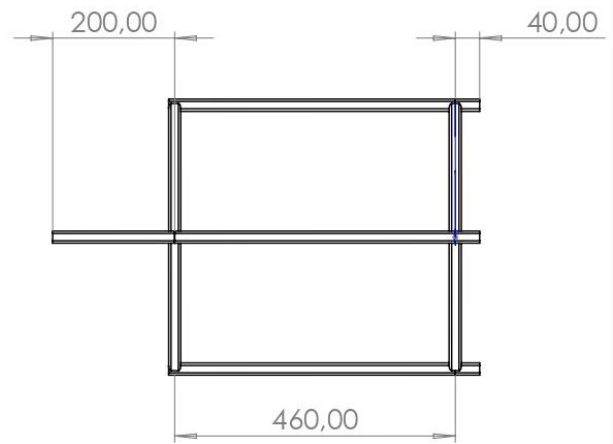
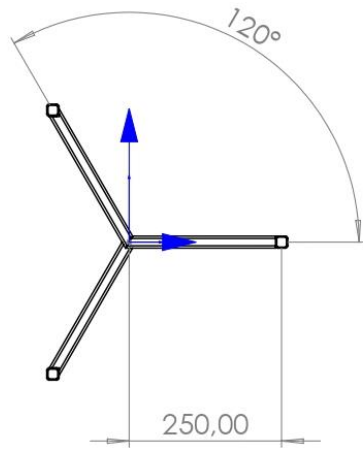
- [27] Naylamp Mechatronics, “Sensor de humedad de suelo capacitivo V1,” <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/538-sensor-de-humedad-de-suelo-capacitivo-v1.html>.
- [28] D. A. Robinson *et al.*, “Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review,” *Vadose Zone Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 358–389, Feb. 2008, doi: 10.2136/vzj2007.0143.
- [29] Siemens, “LOGO! System Manual Preface Getting started with LOGO,” 2020.
- [30] Mouser Electronics, “Power supplies – Siemens LOGO! power,” <https://www.mouser.ec/c/power/power-supplies/?m=Siemens&series=LOGO%21Power>.
- [31] The Home Brewer Perú, “VALVULA SELENOIDE 1/2”,” <https://thehomebrewerperu.com/producto/valvula-selenoide-1-2/>.
- [32] Sawers, “Sensor Nivel de Agua Vertical acero inoxidable,” [https://tienda.sawers.com.bo/sensor-nivel-de-agua-vertical-acero-inoxidable-45mm?srsId=AfmBOooH-tD2wmSuHOKkYFTuZW9WgCIF09FQwWJHZmmOGR5xkFJh\\_Lsh](https://tienda.sawers.com.bo/sensor-nivel-de-agua-vertical-acero-inoxidable-45mm?srsId=AfmBOooH-tD2wmSuHOKkYFTuZW9WgCIF09FQwWJHZmmOGR5xkFJh_Lsh).
- [33] ASTM International, “Designation: A 36/A 36M-05 Standard Specification for Carbon Structural Steel 1,” 2021. [Online]. Available: [www.astm.org](http://www.astm.org),
- [34] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, “Materials Science and Engineering,” 2020.
- [35] M. F. Ashby, *Materials selection in mechanical design*. Butterworth-Heinemann, 2011.

## ANEXOS

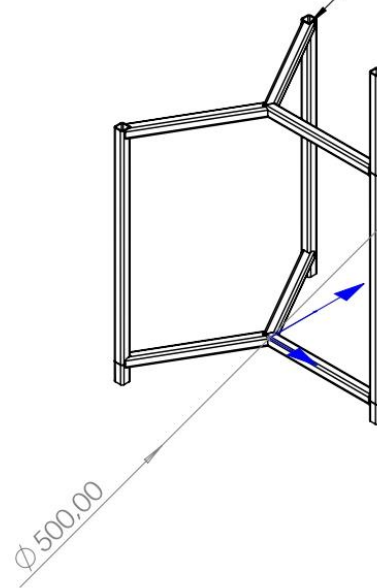
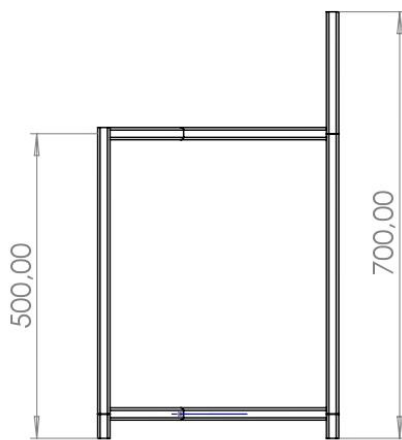
Anexo 1. Diagrama P&ID del lisímetro de pesaje



Anexo 2. Plano Estructura de acero de lisímetro

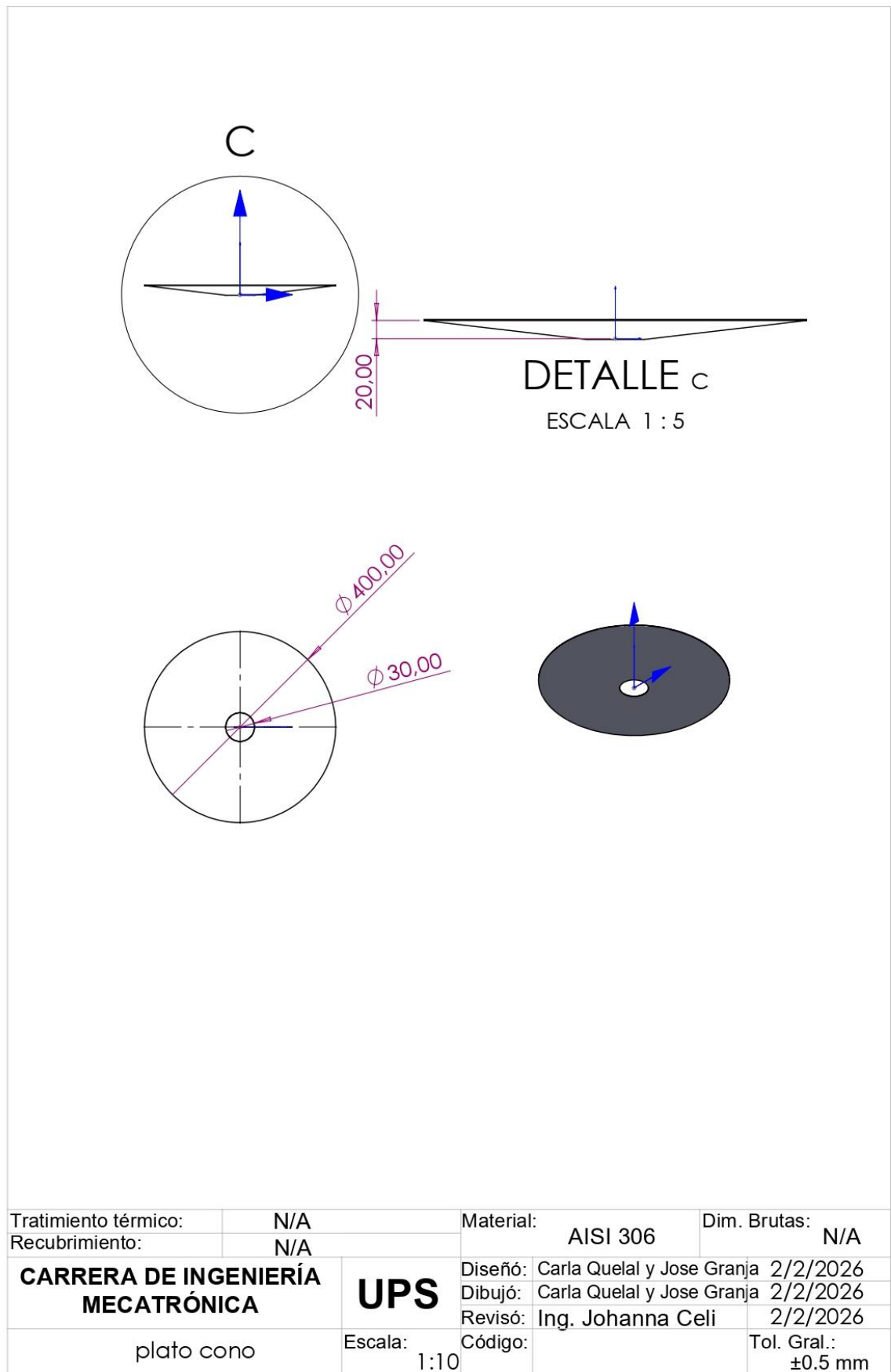


TUBO CUADRADO 20x20x2

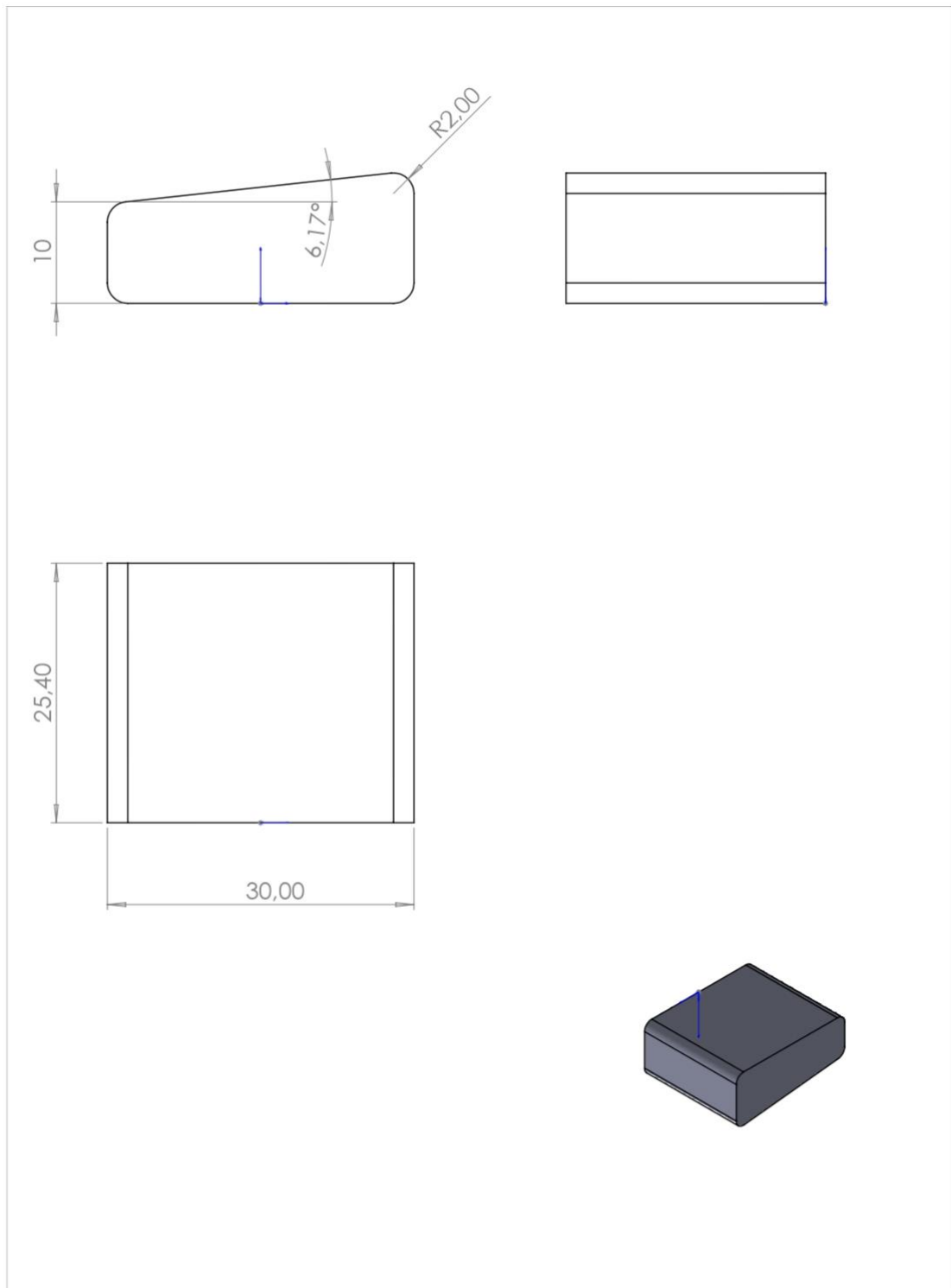


Tratamiento térmico:	N/A	Material:	AISI A36	Dim. Brutas:	N/A
Recubrimiento:	Pintura				
<b>CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>	<b>UPS</b>	Diseño:	Carla Quelal y Jose Granja	2/2/2026	
		Dibujó:	Carla Quelal y Jose Granja	2/2/2026	
		Revisó:	Ing. Johanna Celi	2/2/2026	
Estructura Lisimetro	Escala:	1:10	Código:		Tol. Gral.: ±1.0 mm

Anexo 3. Plato cónico

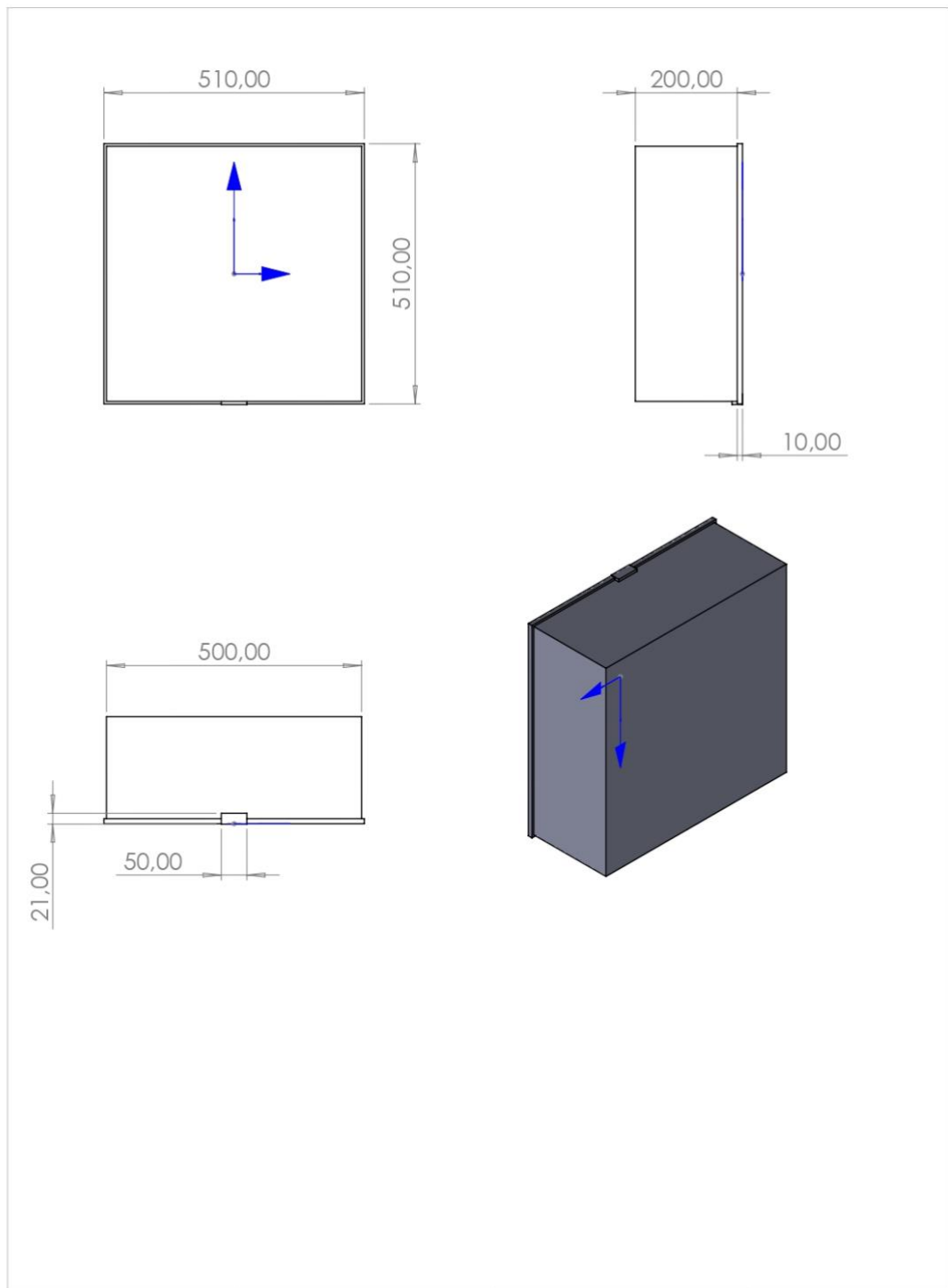


**Anexo 4. Plano almohadilla**



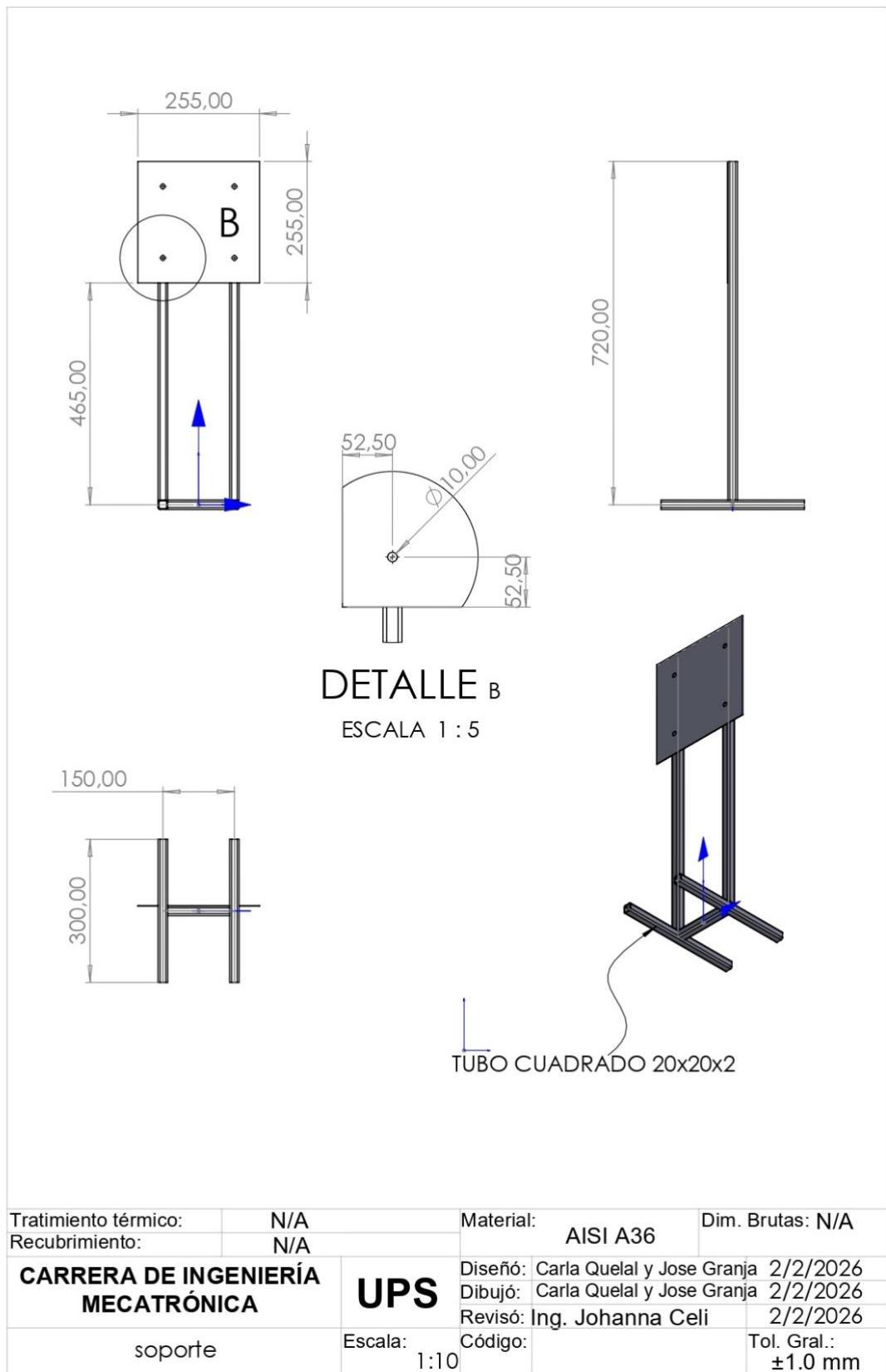
Tratamiento térmico:	N/A	Material:	CAUCHO	Dim. Brutas:	N/A
Recubrimiento:	N/A				
<b>CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>		<b>UPS</b>	Diseñó:	Carla Quelal y Jose Granja	2/2/2026
			Dibujó:	Carla Quelal y Jose Granja	2/2/2026
			Revisó:	Ing. Johanna Celi	2/2/2026
Almohadilla	Escala: 2:1	Código:		Tol. Gral.:	±0.5 mm

**Anexo 5. Plano caja eléctrica**

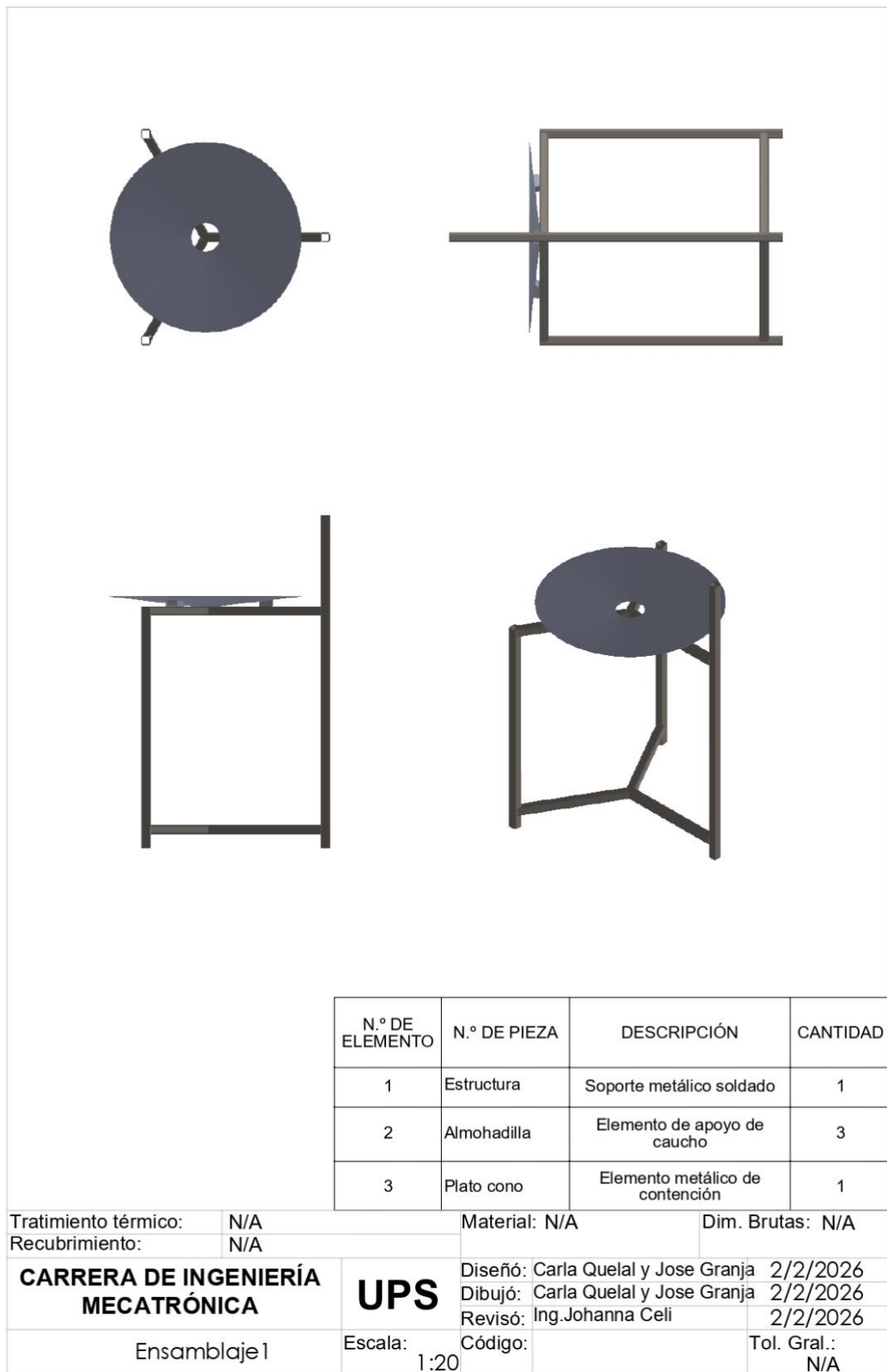


Tratamiento térmico:	N/A	Material:	A36	Dim. Brutas:	N/A
Recubrimiento:	N/A				
<b>CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>	<b>UPS</b>	Diseño:	Carla Quelal y Jose Granja	2/2/2026	
		Dibujó:	Carla Quelal y Jose Granja	2/2/2026	
		Revisó:	Ing. Johanna Celi	2/2/2026	
Caja Electrica	Escala: 1:10	Código:		Tol. Gral.:	±1.0 mm

**Anexo 6. Estructura caja eléctrica**



**Anexo 7. Plano conjunto**



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Estructura	Soporte metálico soldado	1
2	Almohadilla	Elemento de apoyo de caucho	3
3	Plato cono	Elemento metálico de contención	1

Tratamiento térmico:	N/A	Material:	N/A	Dim. Brutas:	N/A
Recubrimiento:	N/A				
<b>CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>	<b>UPS</b>	Diseñó:	Carla Quelal y Jose Granja	2/2/2026	
		Dibujó:	Carla Quelal y Jose Granja	2/2/2026	
		Revisó:	Ing. Johanna Celi	2/2/2026	
Ensamblaje 1	Escala: 1:20	Código:		Tol. Gral.:	N/A