

Sistema de fertirriego inteligente, para optimizar la producción de vegetales cultivados en invernaderos

Sebastián Vásquez F.¹
Universitaria Agustiniana – Uniagustiniana
carlos.vasquez@uniagustiniana.edu.co

Wilmer Cruz Guayacundo²
Universitaria Agustiniana – Uniagustiniana
wilmer.cruz@uniagustiniana.edu.co

Daniel Peñarete Moreno³
Universitaria Agustiniana – Uniagustiniana
daniel.penarete@uniagustiniana.edu.co

Fecha de recepción: 21 de agosto de 2023
Fecha de aprobación: 03 de noviembre de 2023



Cómo citar este artículo: Vásquez Fontanilla, C.S.; Cruz Guayacundo, W.; Peñarete Moreno, D. (2023). Sistema de fertirriego inteligente, para optimizar la producción de vegetales cultivados en invernaderos. *Revista Ontare*, 11, (páginas). DOI:

Resumen

La seguridad alimentaria de una población mundial cada vez más creciente no está garantizada, a causa del cambio climático generado en gran medida por los gases de efecto invernadero, en conjunto con otro tipo de factores, como los bajos modelos de productividad, por eso se deben buscar estrategias y métodos amigables con el medio ambiente que permitan mejorar la calidad y cantidad de los cultivos. Una estrategia común es el uso de invernaderos que permitan controlar las variables (luz, temperatura, humedad, concentración de CO₂, viento, lluvia, entre otras) que intervienen en el buen desarrollo de un cultivo; es aquí donde parte esta investigación, teniendo como objeto de estudio un invernadero de tipo domo geodésico que posee la Universidad Uniagustiniana de Bogotá, y en el que se hace énfasis en el cultivo de zanahoria gracias a su alta producción en el departamento de Cundinamarca, y que además el tiempo de cosecha se extiende durante todo el año. Así pues, la investigación se desarrolló bajo una metodología cuantitativa, en la que se usaron diversas etapas del diseño en ingeniería (confrontación y fuentes de información, formulación del problema e hipótesis, conceptos de diseño, síntesis, modelo analizable, experimentación y optimización, presentación) y se comprobaron los resultados con la herramienta Matlab-Simulink, de esta manera se pudo conocer un caudal teórico, el cual hace parte de la salida de respuesta del sistema propuesto y que fue tomado con base a las necesidades de riego y fertilizantes del cultivo.

Palabras clave: fertirrigación; riego automático; Venturi; Matlab-Simulink; cultivo de zanahoria.

¹ Ingeniero Mecatrónico - Software developer & CNC programmer. Universitaria Agustiniana. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1489-5514>

² Magíster en Ingeniería - Ingeniería Mecánica. Universitaria Agustiniana. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9348-2384>

³ Magíster en Instrumentación y automatización industrial - Ingeniería Mecánica. Universitaria Agustiniana. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8059-0404>

Intelligent fertigation system to optimize the production of greenhouse-grown vegetables

Abstract

Due to climate change, largely generated by greenhouse gases together with other factors, such as low productivity patterns, food security for an ever-growing world population is not guaranteed, which is why strategies and methods that are environmentally friendly and that also allow improving the quality and quantity of crops must be sought. A common strategy is the use of greenhouses that allow controlling the variables (light, temperature, humidity, CO₂ concentration, wind, rain, among others) that intervene in the good development of a crop; it is here, where this research starts, having as object of study a geodesic dome type greenhouse that has the Uniagustiniana University of Bogota and in which emphasis is made on the carrot crop thanks to its high production in the department of Cundinamarca and also that the harvest time is extended throughout the year. Thus, the research was oriented towards a quantitative methodology, in which the seven stages of engineering design were used (Confrontation and sources of information, Formulation of the problem and hypothesis, Design concepts, Synthesis, Analyzable model, Experimentation and optimization, Presentation) and the results were checked with the Matlab-Simulink tool, in this way it was possible to know a theoretical flow rate which is part of the response output of the proposed system and which was taken based on the irrigation and fertilizer needs of the crop.

Keywords: Fertigation; automatic irrigation; Venturi; Matlab-Simulink; carrot crop.

1. Introducción

El cambio climático es una realidad actual, que genera múltiples cambios en el balance natural de múltiples ecosistemas, afectando la vida de millones de plantas, animales y personas, es decir, de toda la cadena alimenticia, dicho cambio ha sido, en gran medida, responsabilidad de los gases de efecto invernadero, generados a partir de los procesos productivos actuales y las formas de transformación de materias, influyendo de tal manera que, como consecuencia se tienen patrones cambiantes de precipitación, aumento de la temperatura global, propagación de enfermedades y mayor frecuencia en fenómenos climáticos extremos.

Por su parte, según un estudio del estado de la seguridad alimentaria realizado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), si continúan las tendencias recientes, el número de personas afectadas por el hambre superará los 840 millones de personas para 2030 (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO, 2021).

Así pues, esta investigación, propuso ayudar en la mitigación del impacto del cambio climático con una propuesta para un sistema de fertirrigación automatizado para el invernadero de la Universidad Uniagustiniana de Bogotá, para ello se comenzó conforme al cuestionamiento que nace en cómo mejorar la cantidad y calidad de los vegetales cultivados bajo techo. Inicialmente, se elaboró una caracterización del cultivo, se definió la instrumentación necesaria para ejecutar el sistema de control, el cual fue validado usando la herramienta de Matlab para simular el comportamiento del sistema, a partir de las ecuaciones representativas de este, y se obtuvo la respuesta del caudal final. Cabe aclarar que el estudio no contempló un entregable tangible o un modelo a escala, sino exclusivamente las gráficas del caudal de salida elaboradas a partir del modelamiento matemático, en conjunto con la instrumentación elegida. Además, es oportuno que el lector tenga claro que el proyecto se elaboró simultáneamente con la construcción del domo geodésico, por lo que se recomienda tener presente que los valores tomados son aproximaciones y no han sido medidas las variables físicas que intervienen en el proceso, así como la falta de un debido análisis de suelo.

El objetivo general de este trabajo es desarrollar una propuesta para un sistema de fertirrigación automatizado para cultivos de vegetales bajo techo. Para lo cual se establecieron los siguientes objetivos específicos:

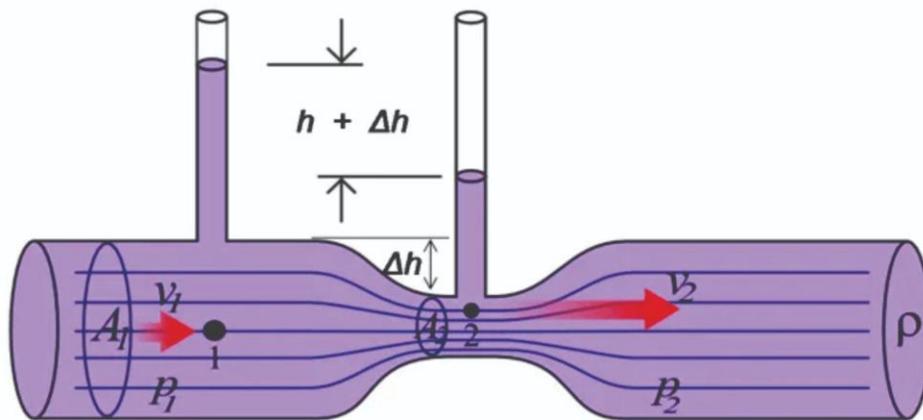
- Caracterizar el cultivo objeto de estudio bajo techo.
- Definir la instrumentación necesaria para la fertirrigación en el cultivo bajo techo.
- Establecer el sistema de control de fertirrigación del cultivo bajo techo.
- Validar el comportamiento del sistema automatizado de fertirriego.

2. Marco teórico

2.1. Efecto Venturi

El efecto Venturi es un fenómeno físico que ocurre cuando un fluido, bien sea líquido o gaseoso, se encuentra moviéndose a través de un tubo de una sección o diámetro menor, que al pasar por dicha sección experimenta un aumento en su velocidad y una disminución en su presión, este es el principio de Bernoulli. En algunas ocasiones dicho aumento de velocidad es tan elevado que puede llegar a producir presiones negativas, si a la sección en donde se producen estas presiones negativas se conecta un conducto, de tal manera que quede una forma de T en el circuito, se genera una aspiración que disminuye la presión y esto es conocido como el efecto Venturi.

Figura 1. Tubo Venturi



Fuente. Munilla (2023).

La ecuación que define el principio de Venturi es:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 \quad (1)$$

Donde:

V = velocidad del fluido en la sección considerada.

g = aceleración gravitatoria.

P = presión a lo largo de la línea de corriente.

γ = peso específico del fluido.

z = altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia.

3. Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad nace a partir de la ley de conservación de la masa, y es una ley fundamental de las ciencias, establecida por Antoine-Laurent de Lavoisier, químico francés, quien indicó que, “en toda reacción química la masa se conserva, es decir, la masa consumida de los reactivos es igual a la masa obtenida de los productos” (Instituto Guatemalteco de Educación Radiofónica – IGER, 2011, p. 203). De allí se puede deducir que el caudal del fluido que pasa a través de una tubería o circuito debe permanecer constante durante todo su trayecto. Su definición matemática se puede observar a continuación:

$$Q_1 = Q_2 \Rightarrow S_1 \times V_1 = S_2 \times V_2 \quad (2)$$

Donde:

S es la superficie o área de las secciones transversales.

V es la velocidad del fluido.

Q es el caudal (Cienciasfera, 2023).

4. Trabajos relacionados

Durante la investigación se encontraron cinco antecedentes que proporcionaron diferentes aspectos, tanto de enfoques metodológicos, como de criterios para la correcta selección de los componentes del sistema, adicionalmente, aportaron ideas y aclararon conceptos de suma utilidad, tales como el modelamiento matemático de un sistema dinámico de caudal variable, por ende, a continuación, se describe brevemente cada uno de ellos.

El proyecto desarrollado por Capraro *et al.* (2010), denominado: “Laboratorio virtual y remoto para simular, monitorear y controlar un sistema de riego por goteo en olivos”, tiene como finalidad controlar un sistema de riego usando goteros y un programa para simular, monitorear y controlar un cultivo de olivos en la provincia de San Juan, en Argentina. De igual forma, el trabajo desarrollado por Zamora (2022), denominado: “Implementación de un sistema de recolección de datos en el laboratorio de agricultura en ambiente controlado”, tuvo como objetivo el desarrollo de un sistema de supervisión y análisis de las variables de cultivos en ambientes controlado, como temperatura, radiación solar y humedad, siendo este último fundamental para optimizar los sistemas de riego de producción agrícola en laboratorios.

Vera *et al.* (2021), en su trabajo: “Hacia la automatización del riego basada en sensores dieléctricos del suelo”, emplea una matriz DOFA para conocer los factores que afectan el riego, y detalla las técnicas de medición utilizadas para la automatización del riego usando sensores de contenido volumétrico de agua del suelo (VSWC).

Fonseca *et al.* (2020), desarrollan una investigación denominada: “Una mirada a las tecnologías emergentes para mitigar los efectos del cambio climático en la agricultura”, donde establecen una relación entre el cambio climático y la producción agrícola a nivel de Cundinamarca, haciendo uso de la base de datos Scopus y el censo nacional agropecuario (CNA). Este trabajo también se alinea con el propuesto por Narváez Mellado y Gutiérrez Pérez (2022), llamado: “Sistema de internet de las cosas para mejorar el proceso de riego en la comunidad de Matará”, donde de igual forma utilizaron herramientas de adquisición de datos con base en el internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) para monitorear en tiempo

real, no solo la gestión del riego, sino las necesidades hídricas de los cultivos del área estudiada, para establecer los efectos adversos del cambio climático y así tomar decisiones más acertadas a los menesteres de las tierras de la región y de sus productos en específico.

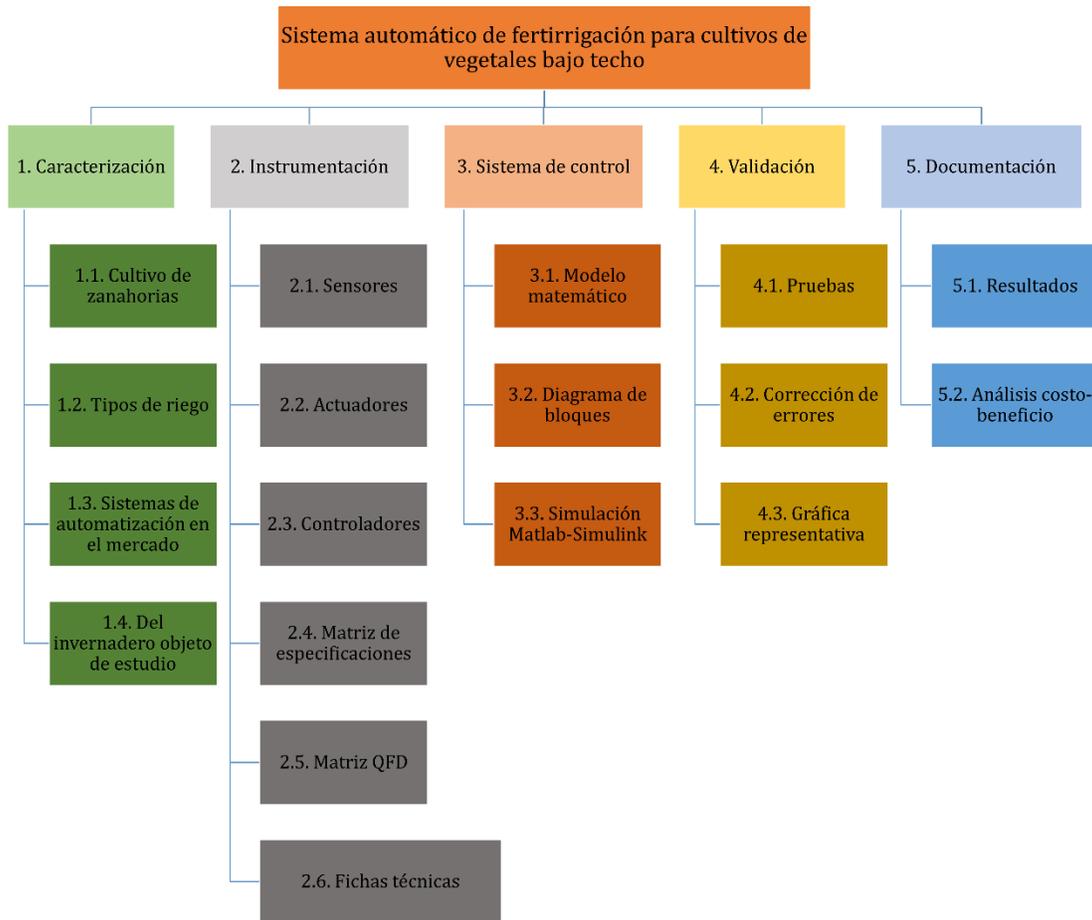
La investigación llevada a cabo por Osma-Molina y Villamizar-Monar (2020), consiste en diseñar un sistema para medir, monitorear y visualizar la temperatura, luz y humedad del ambiente y el suelo, en una huerta urbana ubicada en la localidad de Bosa, en Bogotá; a través de una red IoT para parametrizar dichas variables y generar alertas.

Los últimos antecedentes presentan un ejemplo descriptivo y práctico para la elaboración de un modelo matemático, que permita el control de riego basado en un control proporcional integral derivativo (PID), propuesto por Calderón *et al.* (2021), y el desarrollo de la dinámica de sistemas y la estrategia de control, de nuevo por un PID, de un sistema de dos tanques interconectados al momento para mejorar los tiempos de ejecución del sistema de riego, este último fue escrito y desarrollado por Castaño Giraldo (2020).

5. Materiales y métodos

El proyecto se desarrolla al aplicar la ingeniería concurrente, metodología de diseño que contempla varias etapas que se fundamentan en nuevos métodos (diseño para fabricación y el montaje DFMA, para la calidad DFQ y para el entorno DFE), nuevas herramientas TIC (herramientas asistidas por ordenador, diseño CAD, ingeniería CAE, fabricación CAM e internet de las cosas), y nuevas formas organizativas (equipos pluridisciplinarios) para generar un sistema de fertirrigación integral y amigable con el medio ambiente. Así mismo, la gestión del proyecto se fundamenta en el triángulo de hierro, el cual relaciona el alcance, tiempo y costo durante su ejecución. También se establecieron cinco grandes bloques conforme a la estructura de desglose de trabajo (EDT).

Figura 2. Estructura de desglose de trabajo (EDT)



Fuente. Elaboración propia.

Esta herramienta, en conjunto con un cronograma de tipo Kanban, permitió monitorear y establecer los debidos tiempos para cada una de las actividades, seguidamente se procedió a caracterizar el cultivo con el fin de dar respuesta a los siguientes cuestionamientos:

- ¿Cuánta cantidad de fertilizante se debe agregar al cultivo de zanahorias?
- ¿Cuánta cantidad de agua con fertilizante disuelto, debe succionar el sistema?
- ¿Con qué frecuencia se debe agregar fertilizante al cultivo?
- ¿Cuánta agua se debe regar en el cultivo de zanahorias?

A partir de aquí, es importante que el lector sepa cuál es la variable que se deseó controlar, como se mencionó anteriormente, son muchas las variables físicas que intervienen en el desarrollo de un cultivo en general.

Tabla 1. Variables del problema

Variable	Dependiente	Independiente	Cuantitativa
Temperatura		X	Continua
Humedad relativa	X		Continua
PH		X	Continua
Luz solar		X	Continua
Velocidad (viento)		X	Continua
<i>Flujo volumétrico/caudal</i>		<i>X</i>	<i>Continua</i>

Fuente. Elaboración propia.

En la anterior tabla se muestran algunas de las variables que intervienen en el cultivo, la independencia indica que dicha variable se puede manipular para ver cómo afecta a las otras, sin embargo, la variable humedad relativa es dependiente, debido a que el cultivo está dentro de un invernadero, por lo que la condensación de humedad cambia. La variable marcada con color rojo y en letra cursiva, si bien no es intrínseca al cultivo, está estrechamente relacionada a la humedad relativa y fue la variable que se buscó controlar.

Durante el proceso investigativo se evidenció que el departamento de Cundinamarca es un gran productor de zanahorias, con cerca de 82 832 Ton/Año Cardona (2018), entre los tipos y variedades de este vegetal la más producida es la **Chantenay**, variedad que se destaca por su grosor, entre 5 y 6 cm, su buen sabor y su buena adaptación a suelos pesados, arcillosos y superficiales. Con el fin de dar respuesta a la primera pregunta planteada se tomó en cuenta lo dicho por la Cámara de Comercio de Bogotá (2015) en el *Manual: zanahoria*, “en términos generales, el cultivo de zanahoria necesita de 120 kg/ha de N, 100kg/ha de P2O5 y 300 de K2O kg/ha” (p. 28).

A partir de lo anterior, se conocen las cantidades que representan los macronutrientes en una planta, es decir, nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), y con ello se divide la cantidad en kilogramos necesarios entre la superficie para cubrir, la cual es de 8 m². El resultado de dicha operación fue de 0,0065 kg como masa total de NPK, o lo que equivale también a **6,5 g de NPK**, ahora bien, como se mencionó con anterioridad e incluso recomendado por la Cámara de Comercio y en consulta con Humberto Cuastumal, del Jardín Botánico de Bogotá, (comunicación personal, 30 de marzo de 2023), lo más apropiado es hacer un análisis de suelo, a fin de garantizar la cantidad de macro y micronutrientes presentes en el suelo, así como la humedad, PH y otro conjunto de variables para tener en cuenta. Por lo anterior, se decidió tomar las recomendaciones dadas por Humberto Cuastumal, para la segunda y tercera pregunta anteriormente mencionada.

Aplicar un fertilizante diferente, un día de por medio, para la primera etapa del cultivo (inicial) agregar 0,8 g por litro, para la segunda etapa (desarrollo) agregar 1,1 g por litro y finalmente para la tercera etapa (final) 1,5 g por litro; es decir, en cada etapa ir incrementado 0,3 g de fertilizante NPK, hacer esto cada dos semanas, hasta culminar cada etapa de desarrollo, en una proporción de NPK de 10-20-20 (Humberto Cuastumal, Jardín Botánico de Bogotá, Comunicación personal, 30 de marzo de 2023).

Para hacer esto se elaboró un **calendario de fertilización** conforme a cada una de las tres etapas de desarrollo del cultivo de zanahoria, el cual está disponible en la tabla 1 de la sección de anexos del presente documento, además, se puede concluir que un litro de agua mezclada con cada tipo de fertilizante NPK a una frecuencia de **tres veces a la semana**, hasta cumplir con las tres etapas del cultivo, es suficiente para cubrir las necesidades de fertilización del suelo.

Para dar respuesta a la última pregunta, fue necesario conocer las condiciones de precipitación del lugar donde se cultivó, el tipo de riego que se debía elegir y la lámina de riego.

Para el primer requerimiento, se consultaron los datos históricos de precipitación del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), comprendidos de

febrero a octubre de 2022 (se tomó esta fecha teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, que el cultivo de zanahoria se extiende durante todo el año) y se obtuvo un resultado de entre 512 a 215 mm en un área aledaña (Aeropuerto El Dorado) a la ubicación de la Universidad Uniagustiniana, cabe destacar que al ser un área muy lluviosa, hay bastante condensación en el interior del invernadero.

Para el segundo requerimiento, se eligió un sistema de riego por goteo, debido a su bajo costo, tiempo y esfuerzo necesario para su ejecución.

Para el tercer requerimiento “la zanahoria requiere una lámina de riego de 2,5 a 4 cm/día (25 mm/día a 40 mm/día) con una frecuencia de siete a catorce días” (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015, p. 28).

Sin embargo, dadas las especificaciones que se tenían inicialmente, tanto de la superficie, fertilizantes y condiciones de precipitación, entre otras, se optó por hacer el cálculo de la lámina de riego. Para ello, se elaboró un cálculo a partir de la fórmula tomada por CONADI - Ministerio de Desarrollo Social del Gobierno de Chile (2017):

$$ETc = Eto \times Kc \quad (3)$$

Donde:

- ETc: es la evapotranspiración de cultivo o demanda hídrica (mm/día).
- ETo: es la evapotranspiración de referencia (mm/día).
- Kc: es un factor que ajusta el valor a la condición de cultivo.

Para conocer el ETc, se usó **Climwat**, que es una base de datos climática que se utilizará en combinación con el programa de computadora Cropwat y que permite el cálculo de los requisitos de agua del cultivo, el suministro de riego y la programación de riego (Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO, 2023a).

Para conocer el ETo, se usó la **calculadora de ETo**, es un *software* desarrollado por la División de Tierras y Aguas de la FAO. Su función principal es calcular evapotranspiración de

referencia (ETO) según las normas de la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023b).

Para conocer el Kc, se usó el **paper de la FAO 56, parte B**, donde se encuentran tabulados dichos coeficientes en la página 23, posteriormente, se hizo el cálculo para cada una de las tres etapas del cultivo, donde la variación se presenta en el valor numérico del Kc.

Así pues, se obtuvo que para el cultivo de zanahorias se requieren:

- Etapa inicial: 1,4 mm/día (9,8 mm/semana).
- Etapa de desarrollo: 3,2 mm/día (22,4 mm/semana).
- Etapa final: 2,8 mm/día (19,6 mm/semana).

Conocidos los requerimientos se procedió a multiplicarlos por la superficie a cubrir (en este caso, dado que es un invernadero y que cada planta estaría en una maceta diferente, se halló el área de una maceta y se multiplicó por la cantidad de macetas, obteniendo una superficie total de 8 m², como se mencionó anteriormente) al tomar el dato de superficie y multiplicarlo por la lámina de riego o demanda hídrica, se obtiene así el consumo total del cultivo para cada una de las etapas; teniendo así un total de **413 litros** como total consumo de agua durante todo el crecimiento del cultivo de zanahorias. Es decir, durante los primeros 30 días se necesitaron 78 litros, después durante 60 días más se necesitaron 179 litros y, finalmente, durante 40 días se necesitó de 156 litros.

De esta manera se dio respuesta a todas las preguntas del primer objetivo, y como segunda parte del primer objetivo, se elaboró un diario de campo en el que se registró cada avance de la construcción del domo geodésico, dicho diario se podrá encontrar en la tabla 2 de la sección de anexos del presente documento.

Figura 3. Domo geodésico construcción inicial terminada



Fuente. Elaboración propia.

De manera simultánea se realizó la matriz QFD para transformar las necesidades del proyecto en un diseño con calidad y acorde a las funcionalidades del cliente, en este caso la Uniagustiniana. La matriz QFD o casa de la calidad es una herramienta fiable que permite identificar las ventajas competitivas del diseño propuesto frente al diseño de la posible competencia.

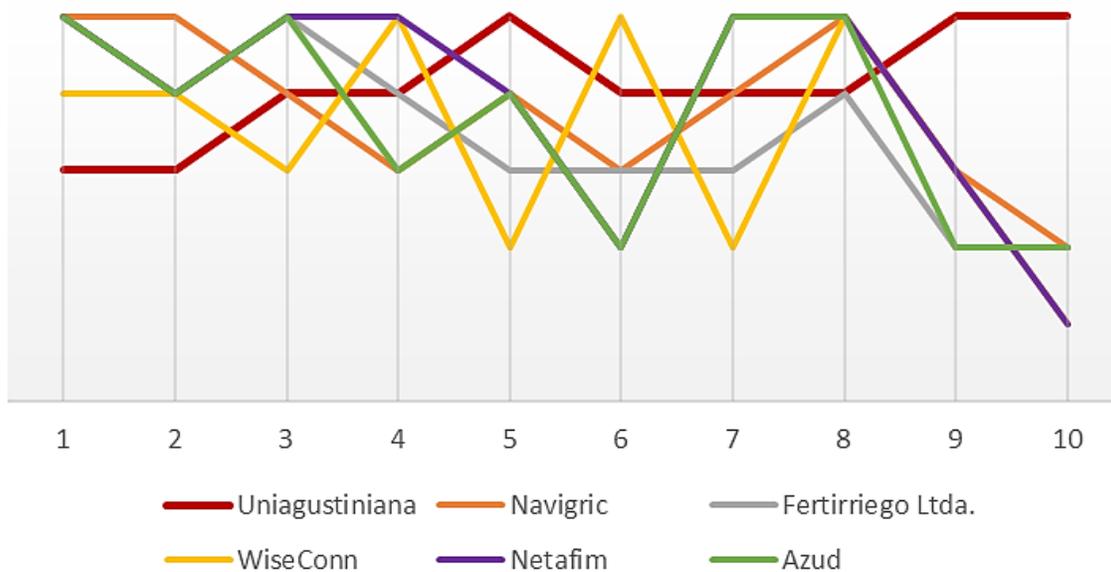
Tabla 2. Variables del problema

#	Requerimientos del cliente	Especificación de ingeniería
1	Control del flujo de agua y fertilizante	Sistema de control
2	Medición de la presión del agua	Sistema de medición de presión
3	Seguridad del sistema	Control de seguridad y paro de emergencia
4	Materiales resistentes a corrosión por agua	Protección IP \geq 65
5	Sistema con 2 tanques	Automatización del proceso
6	Fluido sin impurezas	Sistema de filtrado
7	Estructura física	Integración con el entorno
8	Sistema de riego	Sistema de riego por goteo
9	Tipo de planta (zanahoria)	Sistema adaptativo a las necesidades de riego de las hortalizas
10	Factor económico	Instrumentación de bajo costo

Fuente. Elaboración propia.

Para cada una de las especificaciones de ingeniería anteriormente descritas, se dio una puntuación en contraste con la investigación de los sistemas automatizados de fertirrigación disponibles en el mercado, de allí se obtuvo la siguiente figura de la matriz QFD.

Figura 4. Matriz QFD



Fuente. Elaboración propia.

Con respecto a la anterior figura, se puede decir que la competencia posee elevada calificación con respecto a la estructura y maneras de controlar el caudal de fertirriego, esto se debe, en gran medida, a que cuenta con instrumentación de mayor coste y precisión, incluso capaz de generar reportes acerca del crecimiento y estado del cultivo. Sin embargo, se identifica que los puntos fuertes del diseño propuesto se establecen en la resistencia a la corrosión, el sistema de filtración y adaptabilidad económica.

El siguiente paso fue definir la instrumentación del sistema, conforme al segundo objetivo. Para ello, se elaboraron tablas comparativas para cada uno de los instrumentos seleccionados, con la información técnica detallada y se valoró cada componente con un puntaje entre uno y cien, además, se elaboraron los diagramas y planos P&ID de conexión.

Uno de los elementos más importantes de la propuesta de diseño fue el inyector Venturi (el cual es un dispositivo que permite succionar distintos fluidos, gracias al efecto Venturi y a las presiones negativas); es importante destacar que dicho elemento fue seleccionado con la ayuda de un programa gratuito del cual dispone Mazzei, la empresa fabricante del dispositivo. El resultado del proceso de selección se presenta a continuación.

Figura 5. Resultado de selección de inyector Venturi en el programa Mazzei

Mazzei Injector Selector

ID:	233516	3/23/2023	Prepared by:
Project	FERTIRRIEGO		Mr Sebastian Vasquez
Method	Pressure Reduction		Uniagustiniana
Total Flow:	42 liters/min		NA
Upstream Pressure:	4.3 bar		NA, NA NA
Downstream Pressure:	0 bar		Colombia
Pressure Regulator:	Automatic		
Required Flow:	0.019812903899999998 GPM		
Suction Need:	1 liters/min		
Elevation:	2582 meters		
Additive Weight:	5.094 kg/liter		
Injector Location:	1 meters above the additive		

Recommended Injectors:

Injector	Water flow thru the injector	Injector Inlet Pressure	Injector Outlet Pressure	Maximum Suction Capacity
1583	143.25 liters/min	4.3 bar	0 bar	1.13 liters/min
2083x	129.99 liters/min	4.3 bar	0 bar	3.8 liters/min
885x	47.21 liters/min	4.3 bar	1.03 bar	1.12 liters/min

Fuente. Elaboración propia.

Al ingresar los datos solicitados por el programa (capacidad de succión, elevación, viscosidad, caudal, presión, método de baipás, bomba de refuerzo o flujo continuo) como resultado se obtienen las referencias de los inyectores recomendados.

Tabla 3. Inyectores Venturi

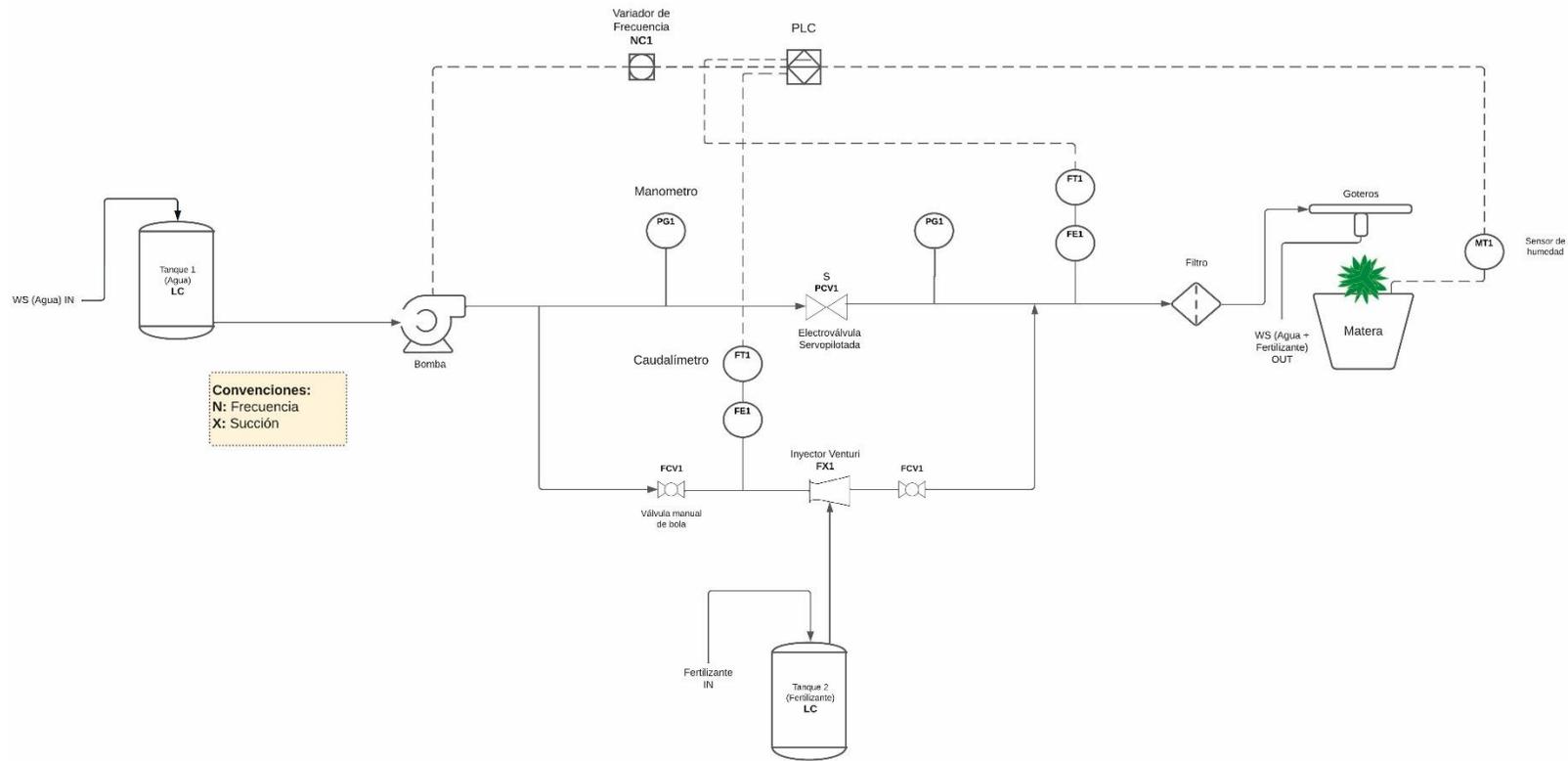
Tipo	Medidor A	Puntaje ítem A	Medidor B	Puntaje ítem B
	Tubo Venturi con rotámetro		Tubo Venturi sin rotámetro	
Imagen		8		6
Caudal máximo de riego	2500 L/h	7	588 L/h	4
Caudal máximo de fertilizante	250L/h	6	40 L/h	3
Caudal máximo	10 GPM (2,27 m3/h)	5	12,6 GMP (3,43 m3/h)	7
Presión máxima	8 kg/cm2 (7,8 bar) (113 psi)	5	3 kg/cm2 (2,94 bar) (42 psi)	4
Medidores de flujo	Rotámetro	7	Ninguna	NA
Escala del rotámetro	40 a 250 mm	7	No aplica	NA
Aspiración	0,04 kg/cm2 (0,3 bar)	3	1,5 kg/cm2 (1,4 bar)	5
Resistente a químicos	Si	8	Si	8
Material	Plástico	7	Plástico	7
Rosca	Rosca	9	Rosca	6
Protección	IP64	9	IP	4
Puntaje		<u>82</u>		<u>50</u>

Fuente. Elaboración propia.

En la tabla anterior se comparan distintos aspectos técnicos de cada uno de los componentes y se selecciona, a partir de fundamentos de carácter ingenieril, el elemento adecuado para el proyecto, conforme al puntaje (en color rojo y letra cursiva) y para cada categoría (actuadores, sensores, sistema de control y misceláneos).

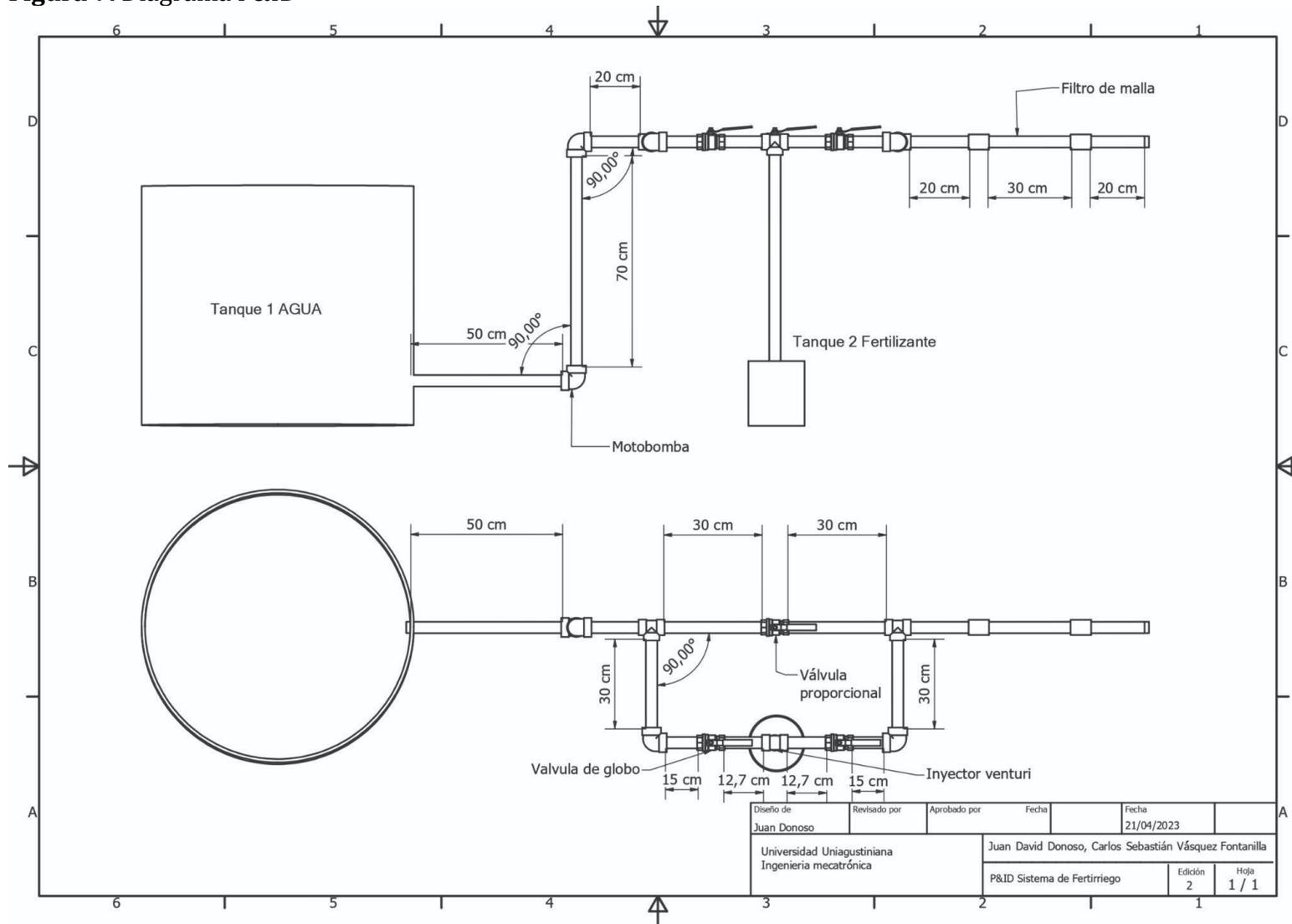
Después de la selección de los elementos se elaboró tanto el diagrama de instrumentación conforme a la norma ANSI/ISA 5.1. como el diagrama *piping and instrumentation diagram* (P&ID) (diagrama de tuberías e instrumentación, en su traducción al español), para facilitar el entendimiento de los esquemas de control y cierre, los requisitos de seguridad y la reglamentación, las secuencias para la puesta en marcha y los detalles operativos y de comprensión, esto se elaboró usando el programa Autodesk Inventor.

Figura 6. Diagrama del sistema de instrumentación



Fuente. Elaboración propia.

Figura 7. Diagrama P&ID



Fuente. Elaboración propia.

Posteriormente, se procedió a establecer el sistema de control a partir de las ecuaciones diferenciales obtenidas de la fórmula de conservación de la masa, principio de Bernoulli y efecto Venturi.

El punto de partida es el balance de masas, conforme a la ley de conservación de la masa definida por Lavoisier, por lo que es necesario que se tenga en cuenta que:

- El sistema no contempló un control de nivel de tanques para ninguno de los dos tanques seleccionados.
- El sistema de purificación y prevención de ingreso de partículas es un elemento pasivo que no influye significativamente en el paso del caudal, sin embargo, sí genera pérdidas, estas no se tuvieron en cuenta.
- La ecuación se presenta bajo tres diferentes puntos de caudal y apertura de la válvula electrónica.
 - **Caso 1:** 80 % del caudal hacia la entrada del inyector Venturi y 20 % del caudal hacia la entrada de la electroválvula con una apertura del 20 %.
 - **Caso 2:** 50 % del caudal hacia la entrada del inyector Venturi y 50 % del caudal hacia la entrada de la electroválvula con una apertura del 50 %.
 - **Caso 3:** 32 % del caudal hacia la entrada del inyector Venturi y 68 % del caudal hacia la entrada de la electroválvula con una apertura del 68 %.

Se eligieron estos porcentajes porque si por el inyector fluye un caudal inferior al 80 % del total que suministra la bomba, no es posible que exista una presión suficientemente constante para la apertura correcta de los goteros, además, el inyector no puede operar a un caudal menor del 30 %, aproximadamente.

$$Q_{out} = Q_{electro} + (Q_{succion} + Q_{out venturi}) \quad (4)$$

La anterior ecuación representa el balance de masas, donde:

- Q_{out} : caudal de salida.
- $Q_{electro}$: caudal de la electroválvula proporcional.
- $Q_{succión}$: caudal de la succión del Venturi.
- $Q_{out Venturi}$: caudal de salida del Venturi.

Cada uno de los elementos de la fórmula anterior fue a su vez definido matemáticamente por otras. El caudal de la electroválvula $Q_{electro}$, fue definido por:

$$Q_{max} = kv \sqrt{\frac{\Delta P}{G}} \quad (5)$$

Donde:

Q_{max} : caudal máximo.

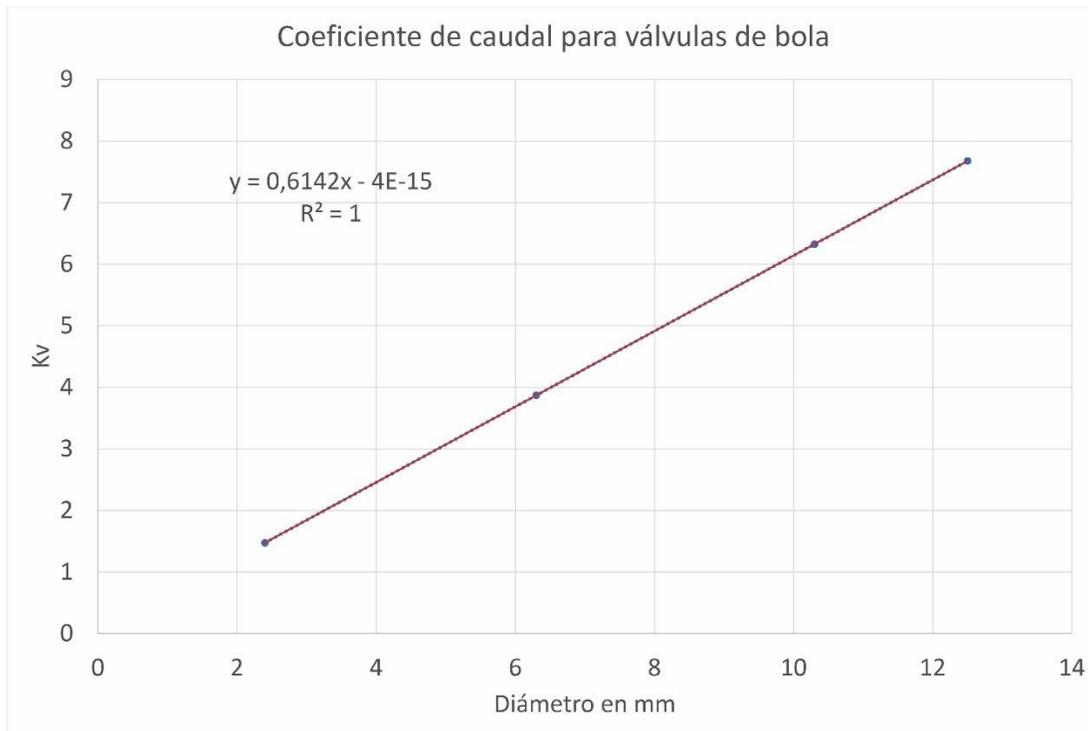
kv : constante de proporcionalidad de la válvula.

ΔP : diferencial de presiones.

G : la gravedad específica del fluido (1 agua).

Para conocer la constante de proporcionalidad kv , se realizó una regresión lineal a partir de los datos del fabricante.

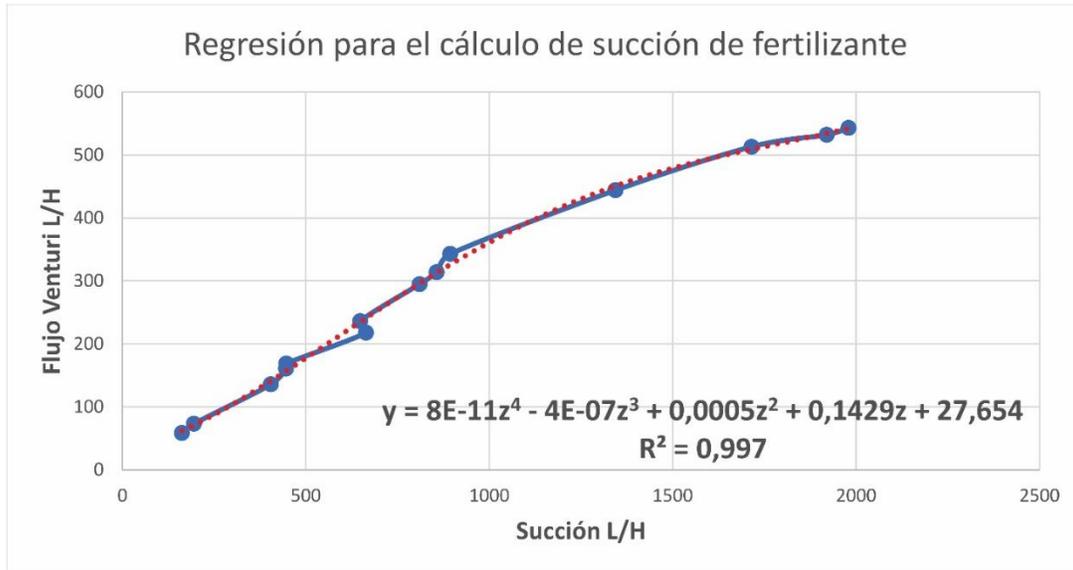
Figura 8. Regresión para el kv de la válvula proporcional



Fuente. Elaboración propia.

Para determinar el caudal de succión $Q_{\text{succión}}$, nuevamente se realizó una regresión polinómica, elaborada a partir de la ficha de datos proporcionada por Mazzei.

Figura 9. Regresión polinomial del caudal de succión



Fuente. Elaboración propia.

Finalmente, para conocer el $Q_{out\ Venturi}$, se usó la fórmula tomada de Villarreal (2018):

$$Q_r = C_d A_0 V_2 \quad (6)$$

Donde:

- Q_r : caudal real del Venturi.
- C_d : coeficiente de descarga.
- A_0 : área cero.
- V_2 : velocidad dos.

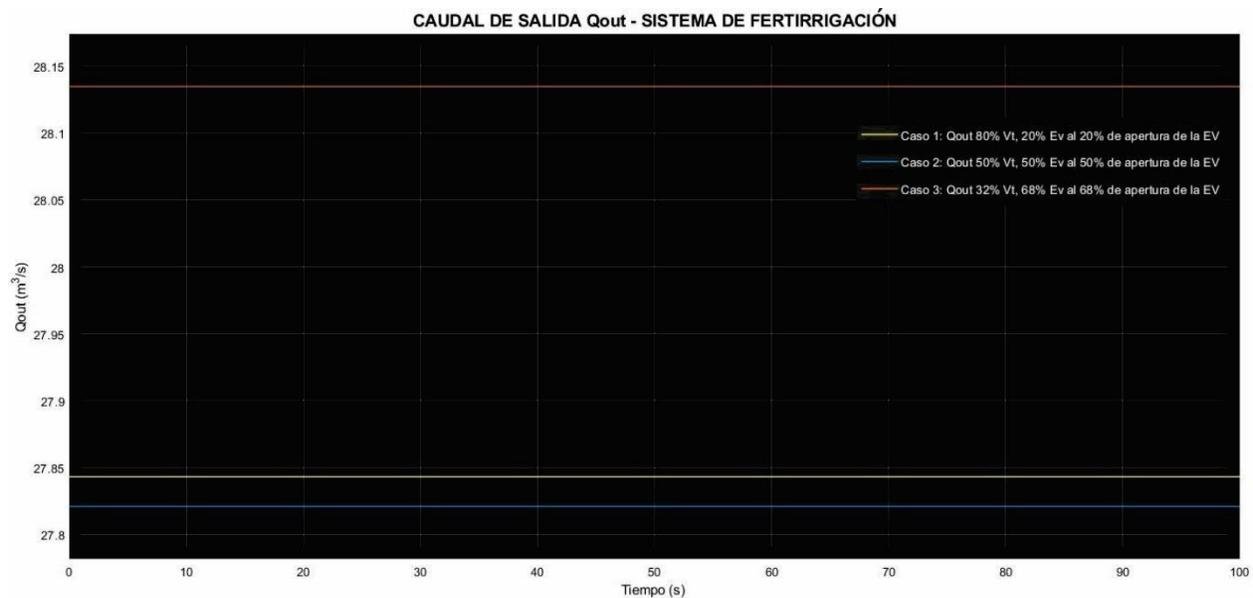
También se determinaron las pérdidas en los accesorios del diagrama P&ID, haciendo uso de:

- Herramienta virtual gratuita “Omni Calculator para pérdidas por fricción” de Dhari (2022).
- Coeficientes de pérdida en sistemas de tuberías y accesorios descritos, por White, (2008).

6. Resultados y discusión

Una vez definida la ecuación general se evaluó en Matlab-Simulink los tres casos de caudal y apertura descritos anteriormente, y se obtuvo lo ilustrado en la figura 10. Además, los resultados de estos cálculos se pueden observar a detalle en las figuras 1 y 2 de la sección de anexos presente en este documento.

Figura 10. Comportamiento del Qout del sistema de fertirrigación



Fuente. Elaboración propia.

Como se aprecia en la figura anterior, el caudal lineal se debió a la falta de derivadas en la ecuación que generen un cambio en el tiempo, es decir, el sistema propuesto es de tipo lazo abierto, adicionalmente, se establece que el caudal para el primer y segundo caso está entre el rango de 27.8 m³/s, mientras que para el tercer caso es superior estando en los 28.15 m³/s, lo cual es lógico, ya que la apertura de la electroválvula hizo que existiera un mayor flujo de fertirriego, debido a que el diferencial de presión es más grande en la garganta del Venturi, y esto permitió succionar mayor cantidad de fluido.

6.1. Análisis costo/beneficio

A continuación, se presenta el coste total del proyecto.

Tabla 4. Cotización estimada

Sección	Cantidad	Descripción	Valor total
Electrónica de potencia	1	Contactador	\$41.000
	2	Breaker	\$25.800
	10	Cable encauchetado por m	\$100.000
Control	1	Sensor de humedad	\$255.818
	1	Variador de frecuencia	\$997.677
	1	PLC	\$606.635
	6	Cable RS-485	\$358.830
	1	Válvula proporcional	\$239.020
	2	Válvula de bola PVC	\$14.000
	1	Bornera	\$35.500
	1	Motobomba periférica	\$321.900
	2	Manómetros con glicerina	\$74.900
	2	Manómetros ultrasónicos	\$250.000
	1	Botón pulsador rojo	\$12.500
	1	Botón pulsador verde	\$12.900
	1	Cable # 12 rojo X 20 m	\$57.900
	1	Cable # 12 negro X 20 m	\$57.900
	1	Cable # 12 azul X 20 m	\$57.000
1	Inyector Venturi	\$361.923	
Estructura	24	Goteros	\$12.000
	1	Filtros de malla	\$55.000
	6	Codos	\$22.400
	3	Tubo T	\$9.300
	10	Tubos de PVC 1"x 3 m	\$149.000
	1	Tanque Eternit	\$184.900
Mano de obra			\$2.345.000
Total			\$6.716.703

Fuente. Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la información reportada en la tabla anterior, se determinó que el proyecto obtuvo un VAN de \$-6,154,004 COP. Lo que implica que el valor de los gastos es mayor al de los ingresos, por su parte, la TIR arrojó un porcentaje del -57 %. Ambos resultados tienen fundamento en que las actividades realizadas no contemplaron la producción de la zanahoria ni su comercialización, y el análisis fue elaborado para adquirir los debidos conocimientos al momento de evaluar la viabilidad del proyecto.

7. Conclusiones

La caracterización del invernadero ofreció una excelente oportunidad para introducirse en la gestión y supervisión de los procedimientos de producción, esto se logra al describir y examinar los componentes que lo integran. Es importante tener en cuenta que la gestión puede variar dependiendo del tipo de invernadero y las características específicas del cultivo. No obstante, el invernadero de tipo domo geodésico de la Uniagustiniana ha sido diseñado de manera que resulta accesible para aquellos que se inician en este ámbito, facilitando la comprensión de los aspectos técnicos del cultivo y el funcionamiento de los procesos de producción dentro de esta estructura.

La matriz de despliegue de la función de calidad (QFD) se erigió como una herramienta confiable y exhaustiva para rastrear los requisitos del cliente. Esta capacidad se refleja en un diseño más pragmático, lo que facilita la adaptabilidad del sistema y mejora la comodidad del usuario. Al analizar la matriz casa de calidad, se puede inferir que el sistema propuesto presentó aspectos destacados en comparación con los sistemas de fertirriego ofrecidos por otras empresas como Novagric, WiseComm, Fertirriego Ltda., Azud y Netafim. En específico, se identificaron como fortalezas del diseño propuesto la utilización de solo dos tanques, su adaptabilidad a las distintas necesidades de riego de varios cultivos, su capacidad para filtrar impurezas y su aspecto económico.

Las tablas comparativas fueron herramientas clave al definir la instrumentación necesaria, dado que organizan la información técnica y asignan puntajes a cada elemento, facilitando la elección entre diferentes instrumentos de manera precisa y fundamentada.

El esquema de instrumentación creado siguiendo las pautas de la normativa ANSI/ISA 5.1, ofreció un método estandarizado para asignar y reconocer las funciones de los instrumentos utilizados en el sistema de fertirriego automatizado. Esta práctica no solo facilitó la comprensión durante la instalación, operación, inicio y mantenimiento del sistema, sino que también aseguró una identificación consistente y clara de cada instrumento involucrado.

Al sembrar en una matera, es esencial considerar que la tierra suele estar más compacta, lo que puede llevar a una mayor pérdida de nutrientes y una menor retención de agua. En el caso específico del cultivo de zanahorias, es crucial tener en cuenta las tres fases de crecimiento durante su desarrollo. Tras realizar cálculos precisos, se determinó que, para la primera fase se requieren 78 litros de riego durante 30 días, para la segunda fase se necesitan 179 litros durante 60 días, y para la última fase se precisan 156 litros durante 40 días, es decir, se requieren 413 litros en total, distribuidos entre las 32 materas.

El rango de caudal en el que fue evaluado cada uno de los casos previos indica: primero, el alto consumo de agua del cultivo, como lo advierte la Cámara de Comercio en su *Manual: zanahoria*; segundo, esto va de la mano con el cálculo previo del consumo de agua necesaria para el cultivo, indicando la relación proporcional entre este cálculo y el caudal teórico validado en la herramienta de simulación.

Se sugiere realizar mediciones de las velocidades de entrada y salida de cada uno de los elementos actuadores y accesorios del sistema, esto permitirá determinar con mayor precisión las pérdidas en cada componente, ya que, a pesar de estar verificado, el programa no brinda total seguridad, por lo que se asumió una pérdida aproximada de un metro. Esta información proporcionará una mayor confianza al reemplazar estas velocidades en la ecuación del Q_{out} , además, permitirá una mayor precisión en los caudales y presiones, lo que aumentará la seguridad en los resultados de caudal obtenidos a través de las gráficas generadas por Matlab-Simulink.

Se sugiere realizar un análisis del suelo para evaluar la calidad nutricional del terreno y así establecer un plan de fertilización más preciso. Asimismo, se recomienda efectuar un análisis del agua proveniente del área de la Uniagustiniana, con el propósito de determinar si los filtros seleccionados tienen la cantidad de malla adecuada para retener las partículas más pequeñas.

8. Referencias

- Cardona, A. O. (2018, agosto 8). *La producción estimada de la zanahoria alcanzó récord nacional en el último año*. AgroNegocios. <https://www.agronegocios.co/agricultura/cual-es-la-produccion-de-zanahoria-en-colombia-2756359#:~:text=Agro-.La%20producci%C3%B3n%20estimada%20de%20la%20zanahoria%20alcanz%C3%B3%20r%C3%A9cord%20nacional%20en,28%2C5%20toneladas%20por%20hect%C3%A1rea>
- Calderón, S., Centella, M., Samaniego, M. y Collado, E. (2021). Sistema de riego basado en controlador PID para la adecuación de la humedad del suelo en invernaderos. *Revista de Iniciación Científica*, 7(1), 9-15. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v7.1.3041>
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2015). *Manual: zanahoria*. <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/bitstream/handle/11520/14309/Zanahoria.pdf>
- Capraro, F., Tosetti, S. y Vita, F. (2010). Laboratorio virtual y remoto para simular, monitorizar y controlar un sistema de riego por goteo en olivos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 7(1), 73-84. [https://doi.org/10.1016/S1697-7912\(10\)70010-8](https://doi.org/10.1016/S1697-7912(10)70010-8)
- Castaño, S. A. (2020). *Descubre cómo usar Simulink para el modelado y control de procesos sin tener que ser un experto*. <https://controlautomaticoeducacion.com/wp-content/uploads/Masterclass-Simulink-2.pdf>
- Cienciasfera. (2023). 2.2. *Ecuación de continuidad*. https://cienciasfera.com/materiales/tecnologia/tecno02/tema08/22_eacuacin_de_continuidad.html
- CONADI - Ministerio de Desarrollo Social del Gobierno de Chile. (2017). *Cómo determinar; cuánto y cuándo regar*. https://www.gea.uchile.cl/archivos/Como_determinar_cuando_y_cuanto_regar_Conadi.pdf
- Dhari, R. (2022). *Friction loss calculator*. Omni Calculator. <https://www.omnicalculator.com/physics/friction-loss>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO. (2023a). *Climwat*. <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/climwat-for-cropwat/en/>

Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO. (2023b). *ETo Calculator*.
<https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/eto-calculator/en/>

Fonseca R. A., Peñarete, D. F. y Ruiz, J. F. (2020). Una mirada a las tecnologías emergentes para mitigar los efectos del cambio climático en la agricultura. En E. Serna (Ed.), *Desarrollo e innovación en ingeniería*, (5ta. ed., pp. 22-31). Instituto Antioqueño de Investigación,
<https://doi.org/10.5281/zenodo.4031208>

Instituto Guatemalteco de Educación Radiofónica – IGER. (2011). *Química II. Segundo Semestre. Grupo Tacaná 11*. <https://books.google.com.co/books?id=Cb8Bqqc-ugoC>

Osma-Molina, J. J. y Villamizar-Monar, G. D. (2020). *Diseño de un sistema IoT para la medición de temperatura, humedad y luz en huertas*. [Trabajo de grado, Universitaria Agustiniiana]. Repositorio Institucional.
<https://repositorio.uniagustiniana.edu.co/handle/123456789/1349>

Munilla, V. (2023, agosto 17). *Efecto Venturi, ¿qué es y cómo funciona?*
<https://www.geoenciclopedia.com/efecto-venturi-que-es-y-como-funciona-734.html>

Narváez, J. y Gutiérrez, W. J. (2022). *Sistema de internet de las cosas para mejorar el proceso de riego en la comunidad de Matará*. [Tesis para optar al título de Ingeniero de Sistemas, Universidad Autónoma del Perú] Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.13067/2078>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO. (2021). *El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo: Transformación de los sistemas alimentarios en aras de la seguridad alimentaria, una nutrición mejorada y dietas asequibles y saludables para todos*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb4474es>

Vera, J., Conejero, W., Mira-García, A. B., Conesa, M. R. y Ruiz-Sánchez, M. C. (2021). Towards irrigation automation based on dielectric soil sensors. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 96(6), 696–707. <https://doi.org/10.1080/14620316.2021.1906761>

Villarreal, A. (2018). *Problemas resueltos de mecánica de fluidos*. Universidad Nacional de Colombia.

White, M. F. (2008). *Mecánica de fluidos* (6ta. ed.). McGraw-Hill.

Zamora, J. N. (2022). *Implementación de un sistema de recolección de datos en el laboratorio de agricultura en ambiente controlado*. [Proyecto de grado en Ingeniería Mecánica]. Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/a8e28138-c9ec-4687-bb69-272c8ff07c43>

9. Anexos

Tabla 1. Calendario de fertilización

ABRIL 2023							
SEMANA	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO	DOMINGO
1	Fertinvensa N 0,8 gr/L		Inicio P 0,8 gr/L		Fertinvensa K 0,8 gr/L		
2							
3	Fertinvensa N 0,8 gr/L		Inicio P 0,8 gr/L		Fertinvensa K 0,8 gr/L		
4							
MAYO 2023							
SEMANA	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO	DOMINGO
1	Fertinvensa N 1,1 gr/L		Inicio P 1,1 gr/L		Fertinvensa K 1,1, gr/L		
2							
3	Fertinvensa N 1,1 gr/L		Inicio P 1,1 gr/L		Fertinvensa K 1,1, gr/L		
4							
JUNIO 2023							
SEMANA	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO	DOMINGO
1	Fertinvensa N 1,1 gr/L		Inicio P 1,1 gr/L		Fertinvensa K 1,1, gr/L		
2							
3	Fertinvensa N 1,1 gr/L		Inicio P 1,1 gr/L		Fertinvensa K 1,1, gr/L		
4							

JULIO 2023							
SEMANA	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO	DOMINGO
1	Fertinvensa N 1,5 gr/L		Inicio P 1,5 gr/L		Fertinvensa K 1,5 gr/L		
2							
3	Fertinvensa N 1,5 gr/L		Inicio P 1,5 gr/L		Fertinvensa K 1,5 gr/L		
4							
AGOSTO 2023							
SEMANA	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO	DOMINGO
1	Fertinvensa N 1,5 gr/L		Inicio P 1,5 gr/L		Fertinvensa K 1,5 gr/L		
2							
3							
4							

Nota: La proporción de nutrientes recomendada es 10-20-20, siendo el 10 % N para el crecimiento de tallo y hojas, 20 % P para el crecimiento de las raíces, flores o frutos y 20 % K para regular el uso del agua y mejorar el desarrollo celular.

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 2. Diario de campo. Sistema automático de fertirrigación para cultivos de vegetales bajo techo

Fecha	20 de septiembre de 2022	
Lugar	Bogotá, Kennedy, Uniagustiniana	
	DESCRIPCIÓN	ANÁLISIS
	<p>Invernadero tipo domo geodésico Dimensiones Diámetro = 3 m. Alto = 2.5 m. Ancho = 2.8 m. Profundidad = 2.7 m.</p>	<p>El domo está cubierto en su totalidad por una lona de plástico, la cual en su parte superior es transparente, suave y lisa al tacto, para soportar el clima externo, en la parte inferior tiene un plástico de color blanco más duro y áspero, con una altura de 77 cm, y está en la base del domo para evitar la filtración de agua y proteger la estructura. Como contrapeso para sostener la lona firmemente en el interior del domo en la zona inferior blanca, tiene unos bolsillos donde están introducidas unas varillas de acero (13 en total) delgadas de 4 mm de grosor, y a las cuales están amarrados 3 sujetadores o amarres plásticos por cada varilla. Cabe destacar que en el interior del domo hay mucha condensación, debido a la falta de un sistema, sin embargo, las gotas de agua no resbalan ni caen con mucha facilidad.</p>
	<p style="text-align: center;">Estructura Uniones - Dimensiones Largo = 75 cm, 60 cm, 50 cm. Ancho = 2 cm, 2.5 cm (en la cabeza). Base - Dimensiones Largo = 3 m. Ancho = 3 cm. Grosor = 4 mm. Puerta - Dimensiones La sección 1 es un cuadrado de 1.17 m X 1.17 m. La sección 2 es un triángulo con una base de 1.17 m y una altura de 1 m aproximadamente.</p>	<p>Las uniones son de acero y poseen un revestimiento de pintura grueso al tacto, se desconoce si el revestimiento es anticorrosivo, además poseen en ambos extremos de sus cabezales un orificio por donde se introduce un tornillo al que se aprieta con una tuerca.</p> <p>La base es de acero y posee la forma de un círculo casi por completo, a ella van fijadas las uniones del domo geodésico, para ello tiene un total de 14 orificios separados cada 63 cm, aproximadamente desde su centro, y a los cuales nuevamente se fijan con un tornillo y una tuerca.</p> <p>La puerta posee dos cremalleras gruesas y grandes que cierran la lona y terminan de darle forma al domo geodésico, además tiene acoplado dos argollas en la parte superior con una tira de plástico para poder amarrar o sujetar la lona sobrante al abrir la puerta.</p>
	<p>Llave para suministro de agua Medida: 1/2 pulgada (13 mm). Conexión - Rosca: 1/2 pulgadas NPT. Temperatura: 85 °C. Presión: 125 lbs/pulg² - 8.8 kg/cm². Material: acero inoxidable. Acabado: latón.</p>	<p>Llave con niple extensión y chapetón, con la conexión tipo macho.</p>

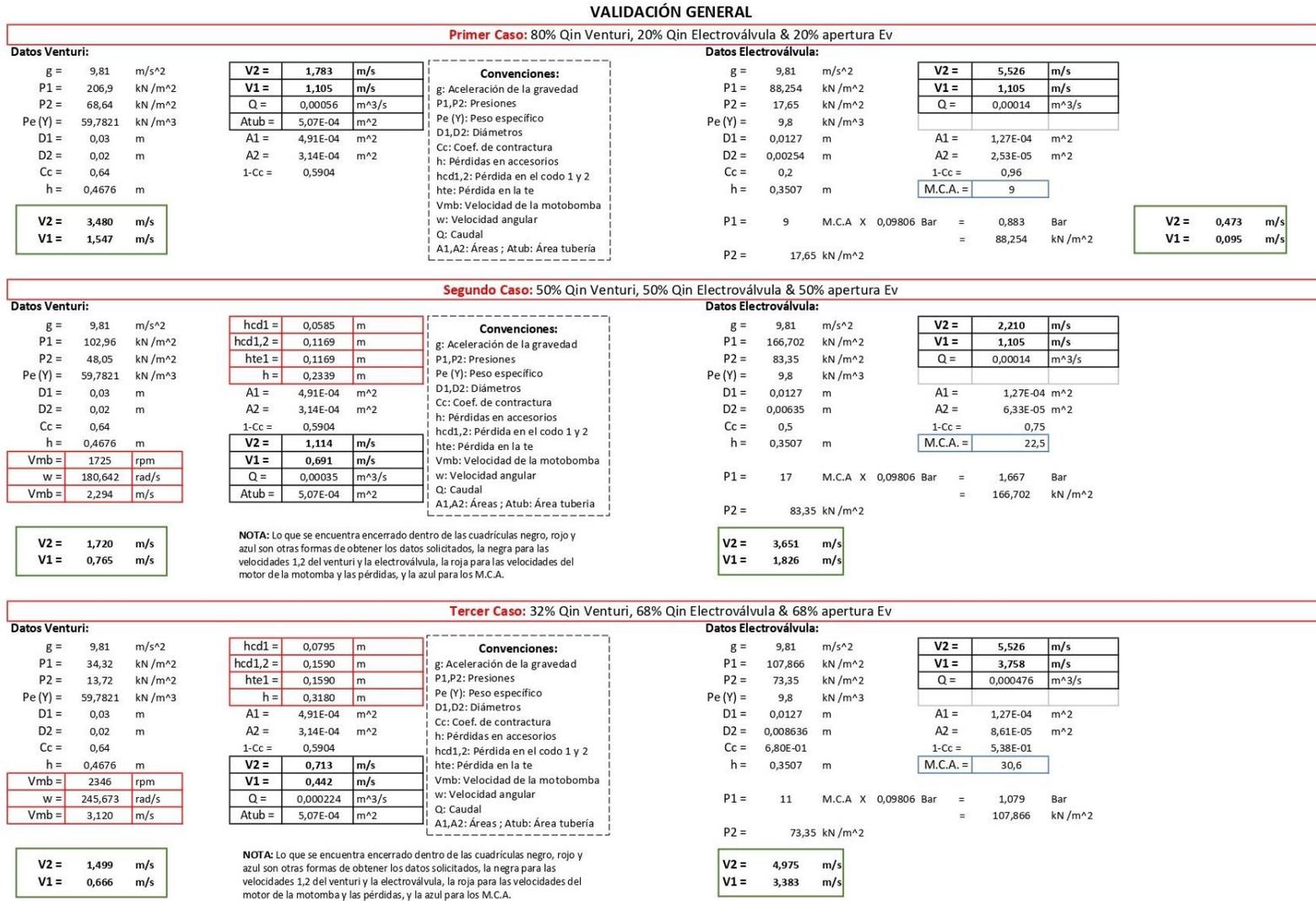
Fecha	23 de septiembre de 2022	
DESCRIPCIÓN	ANÁLISIS	
<p style="text-align: center;">Bancos o soportes para las materas</p> <p style="text-align: center;">Dimensiones</p> <p>Largo = 1.20 m. Alto₁ = 31 cm (desde la base hasta el último escalón). Alto₂ = 15.5 cm (desde la base hasta el primer escalón). Ancho = 59 cm.</p>	<p>Son bases para las materas elaboradas en acero, son pesadas y están recubiertas con una pintura gris, se desconoce si la pintura es anticorrosiva. Hay 4 en total y están distribuidas alrededor del invernadero, según sus dimensiones caben alrededor de 8 materas por cada banco (4 en el escalón inferior y 4 en el superior), para un total de 32 macetas aproximadamente.</p>	
<p style="text-align: center;">Bancos o soportes para las materas</p> <p style="text-align: center;">Dimensiones</p> <p>Diámetro superior = 30 cm. Diámetro inferior = 21 cm. Diámetro intermedio = 27.5 cm. Profundidad = 25.5 cm.</p>	<p>Es de material plástico, tiene una parte lisa y otra corrugada y más áspera en su interior. Es de color terracota. La base posee 9 agujeros y 3 patas plásticas para el soporte de esta, adicionalmente, en las orillas de la parte superior posee un pliegue en el cual se pueden meter los dedos para mejorar la facilidad del agarre.</p>	
<p style="text-align: center;">Semillas para hortalizas (zanahoria)</p> <p>Método de siembra: directa. Época de siembra: tropical (todo el año). Profundidad de siembra = 0.5-1 cm. Germinación: 8 días con temperatura de suelo de 10-30 °C. Días de siembra a cosecha: 80-110 días. Dosis de siembra = 5 g por 10 m².</p>	<p>Es un paquete de 3 g de semillas de zanahoria. En la cual se especifica que se debe sembrar en hileras separadas de 50-60 cm de distancia, y que una vez que las plantan tengan 10 cm de alto se deben entresacar las que sobren, de manera que queden a 5-10 cm sobre la hilera.</p>	
Tierra	Es una bolsa de tierra de 15 kg abonada para sembrar semillas.	

<p>Tanques Eternit 250 litros Dimensiones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tapa Diámetro = 86 cm. Espesor = 3 cm. • Agujero de desagüe Diámetro = ¼" o 0.635 cm. • Agujero de salida Diámetro = ½" o 1.27 cm. • Contenedor Diámetro sección 1 = 81 cm. Diámetro sección 2 = 76 cm. Diámetro sección 3 = 67.5 cm. Diámetro sección 4 = 62 cm. Diámetro sección 5 = 59 cm. Profundidad = 73 cm. 		<p>Tanque de la marca Eternit de 250 litros de polietileno, color negro.</p>
<p>Fecha</p>	<p>04 de octubre de 2022</p>	
<p>DESCRIPCIÓN</p>	<p>ANÁLISIS</p>	
<p>Césped sintético Dimensiones Área = 1 m X 1 m = 2 m².</p>	<p>Es de material polipropileno de color verde, se siente al tacto rugoso y áspero, pero liso individualmente, su propósito es decorativo y hay un total de 5 tapetes.</p>	
<p>Bandejas para semillero Dimensiones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Generales Largo = 52 cm. Ancho = 26.3 cm. • Contenedor Superior = 9.4 cm. Inferior = 6 cm. Profundidad = 8.3 cm. 	<p>Matero cónico de 18 alveolos, color negro. Los alveolos o celdas del semillero son de paredes lisas, lo cual hace más fácil extraer la plántula y da como resultado raíces bien formadas.</p>	
<p>Fecha</p>	<p>27 de enero de 2023</p>	
<p>DESCRIPCIÓN</p>	<p>ANÁLISIS</p>	
<p>Tablero de control Dimensiones Largo: 49.7 cm. Ancho: 39.7 cm. Profundidad: 21.2 cm.</p>	<p>El tablero de control está protegido por una tapa plástica con llave de seguridad, y posee dos pulsadores para empezar o detener el proceso de medición y los dispositivos eléctricos, adicionalmente, tiene un interruptor en la parte inferior que suministra o corta la corriente eléctrica. En la parte superior está ubicada una pantalla</p>	

<p>Trípode del tablero de control Dimensiones Tubo principal: 1.62 m. Tubo de anclaje del tablero: 1.2 m. Patas de soporte: 71 cm.</p>	<p>LCD de la marca Delta, cuya función es servir de interfaz humano-máquina (HMI), y en la parte posterior a esta se encuentra un PLC (se desconocen sus características). Su construcción está basada en las normas estándar ANSI/NEMA 250.</p> <p>Está empotrado en un trípode metálico de acero inoxidable.</p>
<p>Pantalla de visualización Dimensiones Largo: 8 cm. Ancho: 9.8 cm. Profundidad: 4.9 cm.</p>	<p>Pantalla LCD que convierte las señales o pulsos eléctricos de los sensores en lecturas de medición, y permite visualizarla en campo.</p>
<p>Sensor de pH Rango: 3-9 pH. Voltaje: 10-30 V. Amperaje: 4-20 mA. Temperatura de funcionamiento: 0-60 °C.</p>	<p>Sensor de nivel de acidez en tierra (pH).</p>

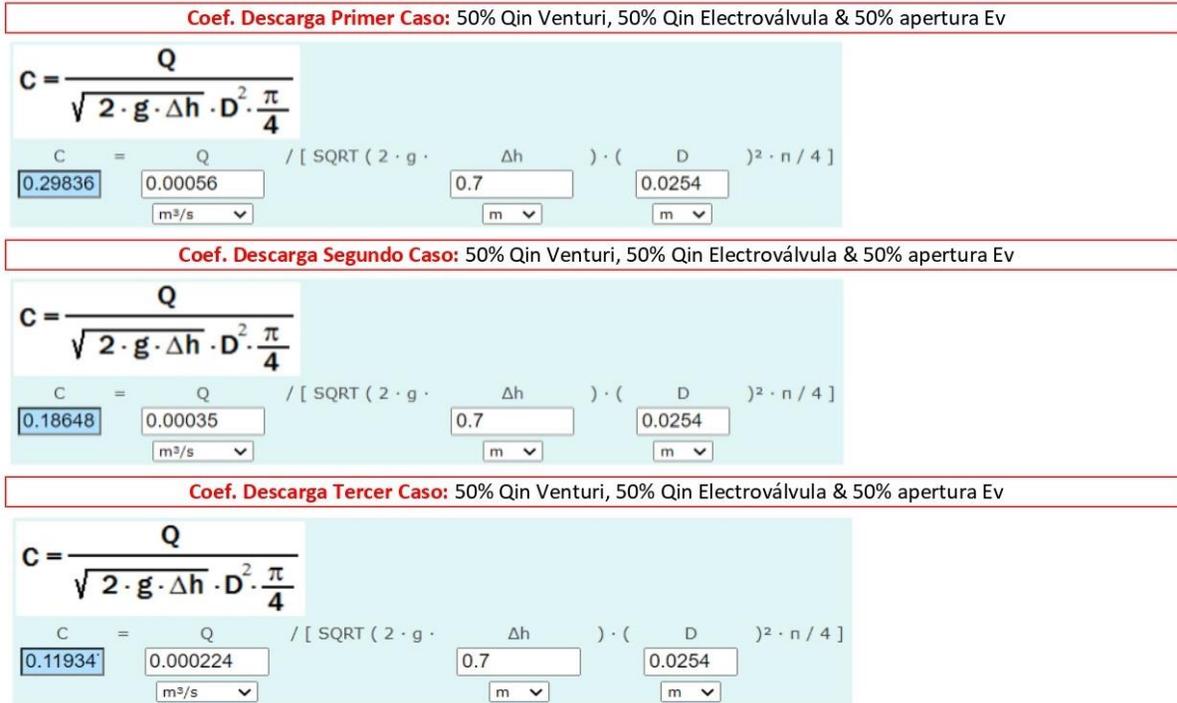
Fuente. Elaboración propia.

Figura 1. Cálculos de caudal, apertura y validaciones de velocidades parte 1



Fuente. Elaboración propia

Figura 2. Cálculos de caudal, apertura y validaciones de velocidades parte 2



Fuente. Elaboración propia