

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

“Sistema de control de bajo coste para la aplicación selectiva de fitosanitarios en invernadero”

Mención: Mecanización y construcciones Agrarias.

Modalidad: Trabajo técnico-experimental.

Curso: 2020/2021

Alumno/a: Bernardo Alfonso Galiano Roa.

Director/es:

Julián Sánchez-Hermosilla López.

Francisco Agüera Vega.

ÍNDICE

Resumen	5
Abstract	5
Palabras clave	5
1. MEMORIA DESCRIPTIVA	6
1.1. INTRODUCCIÓN.	7
1.2. OBJETIVOS.....	8
1.3. JUSTIFICACIÓN.	8
1.4. MARCO LEGISLATIVO.....	9
1.5. ANTECEDENTES.	9
1.6. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS.....	12
1.6.1. Sensores de ultrasonidos.....	12
1.6.2. Sensores de infrarrojos.	13
1.6.3. Sensores LIDAR.....	14
1.6.4. Cámara de visión.	14
1.7. SOLUCION TECNOLÓGICA ELEGIDA.	16
1.8. FUNDAMENTOS TEORICOS PARA EL CÁLCULO DE LA DOSIS.....	17
2. FASES Y CRONOGRAMA	21
3. EXPLICACIÓN DE INCORPORACIÓN DE COMPETENCIAS	24
4. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS, ESPECIFICACIONES, DISEÑO Y MÉTODOS	27
4.1. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS Y ESPECIFICACIONES.....	28
4.1. DISEÑO DEL SISTEMA.	36
4.1.1. INTEGRACIÓN HARDWARE.....	36
4.1.2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE.....	45
4.2. METODOS.	57
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	62
5.1. ANALISIS DE DATOS.....	63
5.2. ANALISIS DE COSTES.....	66
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES TÉCNICAS	67
6.1. CONCLUSIONES.....	68
6.2. RECOMENDACIONES TÉCNICAS.	68
7. BIBLIOGRAFÍA	70

Índice de figuras

Figura 1. Funcionamiento de un sensor de ultrasonidos. Fuente web: crearobot.es.....	12
Figura 2. Funcionamiento de un sensor de infrarrojos. Fuente web: https://proyectosconarduino.com/sensores/sensores-de-distancia-infrarojos-para-arduino/	13
Figura 3. Funcionamiento de un sensor LIDAR. Fuente: Biosystems Engineering, Volumen 200 (https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511020302944)	14
Figura 4. Identificación de partes de una planta mediante visión artificial. Fuente: Embrapa Agricultural Informatics.....	15
Figura 5. Vegetación que se mide para el cálculo del TRV. Fuente: Elaboración propia.	17
Figura 6. Medidas a realizar en un invernadero para calcular el volumen de vegetación. Fuente: Recuperado del artículo “Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors” (Gil, et al., August 2007)	18
Figura 7. Esquema general del sistema de pulverización. Fuente: Elaboración propia.....	28
Figura 8. Tizona 35, diseño y fabricación Carretillas Amate S.L. Fuente: https://www.carretillasamate.com/tizona-35/38-tizona-35.html	29
Figura 9. Detalle de la placa ELEGOO UNO R3. Fuente: (ELEGOO Official, 2021)	30
Figura 10. Detalle del contactor modelo KY-019. Fuente: Elaboración propia.	31
Figura 11. Electroválvula de tres vías fabricada por Arag SRL cód. 463022S. Fuente: Aragnet.	32
Figura 12. Traductor de presión de alta precisión fabricado por SEAFRONT. Fuente: Elaboración propia.	32
Figura 13. Caudalímetro modelo YF-S201. Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 14. Portaboquilla penta-jet eléctrico seletron ½”. Fuente: Elaboración propia.....	34
Figura 15. Detalle boquilla TeeJet, modelo XR11002-VK. Fuente: Recuperado de https://www.teejet.com/CMSImages/TEEJET_ES/documents/catalogs/cat51a-es.pdf	34
Figura 16. Sensor de ultrasonidos DFRobot, modelo JSN-SR04T (Sensor+placa amplificadora). Fuente: www.digikey.es	35
Figura 17. Diagrama de conexión al microcontrolador de un contactor KY-019. Fuente: Recuperado de https://arduinomodules.info/ky-019-5v-relay-module	37
Figura 18. Detalle de la electroválvula proporcional utilizada. Fuente: Elaboración propia.....	37
Figura 19. Detalle de conexiones eléctricas para el movimiento de apertura/cierre electroválvula mediante inversión de la polaridad. Fuente: Recuperado de www.aragnet.com	38
Figura 20. Detalle del sensor de presión acoplado en el circuito. Fuente: Elaboración propia.	39
Figura 21. . Diagrama de conexión al microcontrolador del sensor de presión. Fuente: Recuperado de https://es.aliexpress.com/item/32849969834.html	39
Figura 22. Detalle de la ubicación del caudalímetro. Fuente: Elaboración propia.	40
Figura 23. Diagrama de conexión al microcontrolador de un caudalímetro YF-S201. Fuente: Recuperado de http://chips.mecatronicum.com/tutorial-sensor-de-flujo-yf-s201	40
Figura 24. Detalle de la barra portaboquillas. Fuente: Elaboración propia.	41
Figura 25. Detalle de conexiones eléctricas para el movimiento de apertura/cierre electroválvula. Fuente: Recuperado de www.aragnet.com	41
Figura 26. Funcionamiento de un sensor de ultrasonidos DFRobot modelo JSN-SR04T. Fuente: Recuperado de https://wiki.dfrobot.com	42
Figura 27. Diagrama de conexión a un microcontrolador de un sensor de ultrasonidos DFRobot, modelo JSN-SR04T. Fuente: Recuperado de https://wiki.dfrobot.com	44
Figura 28. Detalle de la interfaz para programar placas microcontroladoras basadas en Arduino. Fuente: Wikipedia recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Arduino_IDE	45
Figura 29. Diagrama de flujo de la aplicación. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 30. Estructura y relaciones de los ficheros de la aplicación. Fuente: Elaboración propia.....	47
Figura 31. Malla de simulación de la vegetación. Fuente: Elaboración propia.	57
Figura 32. Módulo de control. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 33. Carretilla de pulverización. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 34. Malla retranqueada. Fuente: Elaboración propia.....	59

Figura 35. Malla con huecos. Fuente: Elaboración propia. 60

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen tipos de sensores analizados. Fuente: Elaboración propia. 15
Tabla 2. Cronograma temporal de las fases de desarrollo del proyecto. Fuente: Elaboración propia.
..... 23
Tabla 3. Caudales según presión boquilla TeeJet, modelo XR11002-VK. Fuente: Recuperado de
https://www.teejet.com/CMSImages/TEEJET_ES/documents/catalogs/cat51a-es.pdf 34
Tabla 4. Tabla de ensayos test de Duncan. Fuente: Elaborada a partir del Software SPSS. 65
Tabla 5. Valoración de los materiales utilizados en el desarrollo del sistema de pulverización.
Fuente: Elaboración propia. 66

Índice de gráficos

Gráfica 1. Variación del PRV a lo largo de la línea de vegetación simulada en el ensayo nº1. Fuente:
Elaboración propia. 64
Gráfica 2. Variación del PRV a lo largo de la línea de vegetación simulada en el ensayo nº2. Fuente:
Elaboración propia 64
Gráfica 3. Variación del PRV a lo largo de la línea de vegetación simulada en el ensayo nº3. Fuente:
Elaboración propia 65

Resumen

En el presente trabajo se ha diseñado y desarrollado un sistema de aplicación selectiva sobre los cultivos hortícolas de invernadero. El sistema está compuesto por elementos de bajo coste, para que sea accesible económicamente a explotaciones de cualquier tamaño.

El principal objetivo de este sistema para la aplicación de productos fitosanitarios y nutricionales es el de mejorar la eficacia química, reducir los costos laborales, minimizar los peligros laborales y reducir el daño ambiental, sobre todo en lo referente a la contaminación de suelos y acuíferos.

Para la consecución de estos objetivos se ha instalado un sistema basado en la medición de la vegetación mediante sensores de ultrasonidos ubicados en el vehículo, de manera que conforme este avanza, calcula en tiempo real y de forma continua el tamaño del dosel, detecta el estado de desarrollo vegetativo de cada una de las plantas, si hay ausencia de vegetación producida por alguna enfermedad, etc... y en función de los parámetros observados por los sensores, actúa sobre las electroválvulas asociadas a cada una de las boquillas para aplicar el volumen de disolución fitosanitaria óptimo.

Abstract

This current dissertation is focus on a selective application system about greenhouse horticultural crops, which has been designed and managed so as to allow his use to farm of all sizes due to the fact that the system is formed of low-cost elements.

Indeed, the main aim of this system is to improve chemical efficiency, reduce labor costs, minimize occupational hazards and decrease environmental damage, especially in relation to soil and aquifer pollution.

Furthermore, in order to ensure the aim, a system has been installed based on the measurement of vegetation using ultrasound sensors located in the vehicle with the purpose of measuring the area of a canopy in real time. Also, it detects the state of vegetative development of each plant and if there is an absence of vegetation produced by some disease, etc. Considering all parameters measured by the sensors, this system acts on the electro valves associated with each of the nozzles to apply the volume of optimal solution phytosanitary.

Palabras clave

Agricultura precisión, Dosificación inteligente, Sensores adaptativos.

1. MEMORIA DESCRIPTIVA

MEMORIA

1.1. INTRODUCCIÓN.

Durante los últimos años, la producción alimentaria bajo plástico, cada vez es más competitiva, esto hace que los precios de los productos que se obtienen sean más bajos, por tanto, para que las explotaciones sean rentables estas tienen que recurrir a técnicas que permitan un aumento de la producción y sobre todo una mayor protección vegetal, debido a que la producción de hortalizas en invernadero se caracteriza por una alta densidad de siembra, alta temperatura y elevada humedad, esto provoca la proliferación de enfermedades y plagas. Aunque los sistemas biológicos de control de plagas se emplean cada vez más, sigue siendo necesario utilizar el control químico, ya sea sólo o en combinación con otros sistemas de control integrados. Todo esto sin perder de vista que la producción de alimentos de alta calidad de una manera más segura es uno de los objetivos más importantes de la agricultura moderna (Sánchez-Hermosilla, et al., 2012).

Teniendo en cuenta lo anterior, la aplicación de productos fitosanitarios para el control de plagas y enfermedades cobra en este sector una gran importancia de la que son conscientes los productores, siendo además uno de los principales costes de este tipo de explotaciones, pero a veces, le restan importancia o ignoran los daños colaterales que provocan estos productos cuando se hace un mal uso de ellos. El uso excesivo de estos productos conlleva los siguientes riesgos medioambientales (Becerra, 2010):

- Contaminación del agua tanto superficial como subterránea: Esta es producida por la aplicación de plaguicidas en el suelo o por exceso en la aplicación aérea sobre las plantas que hace que precipite y se deposite en el suelo del invernadero, donde a través de la percolación del agua a través del suelo del invernadero pasan a los acuíferos.
- Contaminación del suelo: Tiene como fuente la misma del apartado anterior, habiendo compuestos que se unen más fuertemente a los coloides del suelo (sobre todo en terrenos arcillosos) y pueden permanecer durante mucho tiempo.
- Presencia de fitosanitarios en los productos agrarios: En muchas ocasiones mediante análisis se han encontrado concentraciones de productos que exceden los valores límites permitidos, procedentes de plaguicidas usados en el manejo del cultivo, que son persistentes y bioacumulativos.
- Presencia de fitosanitarios en los restos vegetales: Al igual que en el apartado anterior, según estudios realizados se han detectado la presencia de plaguicidas en restos vegetales procedentes de invernaderos utilizados como alimento animal, por lo que es urgente la necesidad de controlar estos restos post-cosecha, en particular si se utilizan como alimento de ganado.
- Presencia de fitosanitarios en los plásticos de invernaderos: De igual forma, que cuando se realiza un tratamiento dentro de un invernadero parte del producto pasa al suelo contaminándolo, con las cubiertas de plástico del invernadero y los tejidos plásticos usados para cubrir los suelos ocurre lo mismo, estos se quedan impregnados con los productos fitosanitarios absorbiéndolos, con lo que se debe tener un especial cuidado a la hora de manipularlos y/o gestionar los residuos.

Otros aspectos a tener en cuenta en el uso de los productos fitosanitarios y no menos importantes son:

- Estos productos son peligrosos para la salud de aquellas personas que los manipulan y acentuándose aún más por las características que tiene un invernadero al tratarse de un espacio cerrado, de manera que, los aerosoles que se producen con la pulverización se quedan dentro del recinto aumentando su concentración que posteriormente son inhalados por los operadores que están realizando las tareas de aplicación (Rincón, et al., 2018).
- El alto coste económico que tienen los productos, que hace que los tratamientos deban de ser optimizados para evitar una reducción en los beneficios.

La aplicación de productos fitosanitarios en invernadero se realiza mayoritariamente mediante pistolas pulverizadoras, debido a que se trata de equipos de bajo coste, que se adaptan bien a diferentes configuraciones de cultivo en invernadero y son fáciles de usar (Sánchez-Hermosilla, et al., 2012). Sin embargo, son equipos de bajo nivel tecnológico que suelen trabajar a elevadas presiones y con volúmenes de aplicación excesivos, dando lugar a importantes pérdidas en el suelo (Sánchez-Hermosilla, et al., 2011 y 2012) y a un elevado riesgo de exposición de los aplicadores (An, et al., 2015).

1.2. OBJETIVOS.

En general, este proyecto persigue los principios de la tecnología de aplicación variable de insumos (Variable Rate Technology) ajustada a las necesidades del cultivo. Esta tecnología está experimentando un importante desarrollo en los últimos años y se enmarca dentro de la denominada agricultura de precisión o agricultura inteligente.

El objetivo del presente trabajo consiste en diseñar y evaluar un sistema de control de la pulverización, de bajo coste, adaptado a equipos pulverizadores autopropulsados utilizados en cultivos hortícolas en invernadero. Se pretende que el sistema disponga de los sensores adecuados para la detección de la vegetación, sensores de control y un conjunto de electroválvulas que accionen la pulverización sólo en las zonas con presencia de plantas, así como de los algoritmos adecuados para dosificar el volumen de aplicación a la cantidad de vegetación, utilizando estrategias propias de la pulverización adaptada al cultivo (CAS, Crop Adpted Spraying).

1.3. JUSTIFICACIÓN.

Los cultivos bajo invernadero se desarrollan habitualmente bajo unas condiciones de humedad y temperatura que favorecen el desarrollo de plagas y enfermedades, dando lugar a una incidencia superior a los cultivos al aire libre. Aunque en los últimos años se están utilizando estrategias de control biológico que están dando muy buenos resultados (Sánchez-Hermosilla, et al., 2011), todavía el uso de fitosanitarios tiene una gran importancia.

La mayor parte de las aplicaciones fitosanitarias se llevan a cabo mediante equipos manuales, pistolas o lanzas pulverizadoras, de escaso desarrollo tecnológico y difíciles de calibrar, dando lugar a importantes pérdidas en el suelo (Cabello, 1996; Sánchez-Hermosilla et al. 2011 y 2012) y para la salud de los operarios (Baltazar, et al., 2014; An et al. 2015). Estos problemas no son exclusivos de los cultivos hortícolas en invernadero, también aparecen en plantaciones frutales y en cultivos extensivos al aire libre (Ritter, et al., 1990; Cerejeira, et al., 2003). Para paliar estos problemas se están implementando en los equipos pulverizadores tecnología que permite adaptar el volumen de aplicación a las características de la vegetación (Giles, et al., 1989; Gil, et al., 2007b; Giles, et al., 2011).

Hasta ahora la mayoría de los desarrollos, en este sentido, han ido orientados a la aplicación de fitosanitarios en olivicultura, viticultura y frutales (manzanos, melocotoneros,...) (Sutton y Unrath, 1988; Manktelow y Praat, 1997; Gil, et al., 2007). Sin embargo, no existen muchos estudios realizados en cultivos de invernadero donde un dosel, completamente desarrollado que parece una pared vertical casi sin separación entre plantas. Se han diseñado y desarrollado algunos prototipos de vehículos para la aplicación selectiva en invernaderos que detectan las zonas en las que no hay vegetación cerrando el sistema pulverizador de forma autónoma en estas áreas o en los extremos de las líneas de cultivo (Pawlowski, et al., 2017). Pero estos prototipos no tienen en cuenta cuando en una hilera nos encontramos distintos tamaños de vegetación para que en estos casos solo pulverice donde esta esté presente.

Por tanto el presente proyecto viene justificado por su:

- Valor científico: Permite profundizar en el conocimiento científico mediante la aportación de datos empíricos obtenidos en la fase de prueba, contraste de conocimientos previos, exploración de un nuevo enfoque.
- Valor social: Permite hacer una mejora social a nivel de salud tanto de los operarios que lo van a utilizar como de los consumidores a los que van destinados los productos.

- Valor práctico: El trabajo realizado tiene aplicabilidad real.
- Valor teórico: Aporta una comparativa de estudios anteriores y se describen nuevas soluciones.
- Valor económico: El proyecto tiene como uno de sus objetivos principales que el sistema de pulverización sea de bajo coste.

1.4. MARCO LEGISLATIVO.

Normativa aplicable Estatal (Ministerio de Agricultura. Pesca y Alimentación, s.f.):

- Ley 43/2002, de Sanidad Vegetal.
(Recuperado de https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/medios-de-produccion/LEY%20SANIDAD%20VEGETAL_tcm30-134860.pdf).
- Real Decreto 1702/2011, de 18 de noviembre, sobre inspecciones periódicas de los equipos de aplicación de productos fitosanitarios.
(Recuperado de https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/medios-de-produccion/Real%20Decreto%201702-2011%20inspeccion%20equipos%20aplicacion%20productos%20fitosanitarios_tcm30-134741.pdf).
- Real Decreto 1311/2012, sobre el uso sostenible de los fitosanitarios.
(Recuperado de https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/medios-de-produccion/Real%20Decreto%201311-2012%20uso%20sostenible%20productos%20fitosanitarios_tcm30-135009.pdf).
- Orden AAA/1053/2012, Laboratorio Nacional de Referencia.
(Recuperado de https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/medios-de-produccion/Orden%20AAA-1053-2012%20Laboratorio%20Nacional%20Referencia_tcm30-134976.pdf).

Normativa aplicable en Andalucía (Junta de Andalucía, s.f.):

- Decreto 96/2016, de 3 de mayo, por el que se regula la prevención y lucha contra plagas, el uso sostenible de productos fitosanitarios, la inspección de equipos para su aplicación y se crea el censo de equipos de aplicación de productos fitosanitarios.
(Recuperado de <https://www.juntadeandalucia.es/boja/2016/86/2>).

1.5. ANTECEDENTES.

Los graves problemas que los fitosanitarios causan en el medio ambiente han dado lugar a que se realicen numerosos estudios encaminados a conseguir un uso eficiente de los mismos, permitiendo una agricultura con unos niveles de producción adecuados de una forma más sostenible. En este sentido, los primeros trabajos fueron orientados a realizar pulverizaciones adaptadas al cultivo. La determinación de la cantidad de vegetación y su posterior relación con el volumen de aplicación es la base de las técnicas de “Pulverización Adaptada al Cultivo” (Crop Adapted Spraying, CAS) utilizadas por diversos investigadores (Sutton y Unrath, et al., 1988; Rüegg et al., 1999; Gil et al., 2005; Godyn et al., 2005; Gil et al., 2007; Pergher y Petris, et al., 2008) para la aplicación de productos fitosanitarios en diferentes cultivos y plantaciones frutales, y tiene por objetivo mantener constante la cantidad de producto depositado sobre cada órgano de la planta, independientemente de la altura o porte del cultivo. De esta forma, se pretende realizar un uso más racional de los fitosanitarios, de acuerdo a las necesidades reales del cultivo y con un mayor respeto al medio ambiente.

Byers et al. (1971) define un método de dosificación para plantaciones frutales basado en la caracterización de la masa vegetal mediante un parámetro denominado TRV (Tree Row Volume), consistente en determinar el volumen de aplicación en función del volumen de vegetación presente en el cultivo por unidad de superficie. Este método ha permitido optimizar el uso de fitosanitarios y ha dado buenos resultados en plantaciones de manzano (Sutton y Unrath, et al., 1988; Manktelow y

Praat, et al., 1997), frutales de hueso (Rüegg et al., 1999) y en viña (Gil et al., 2007; Siegfried et al., 2007). Para cultivos hortícolas en invernadero Sánchez-Hermosilla et al. (2013) definen el PRV (Plant Row Volume), con idéntico significado que el TRV, pero adaptando la terminología a líneas de plantas. Proponen un modelo para establecer los volúmenes de aplicación en tomate que ha dado buenos resultados.

El cálculo del TRV o PRV requiere la medida de parámetros geométricos de la vegetación (altura, anchura y distancia entre líneas de cultivo), de esta forma, se determina el volumen de vegetación del cultivo por unidad de superficie. Este método permite estimar el volumen de aplicación y optimizar el uso de fitosanitarios, pero presenta una serie de inconvenientes:

- 1) Al realizarse las medidas de forma manual hay un error que se comente.
- 2) No todas las filas tienen las mismas dimensiones lo que implica medir todas las que hay en la parcela, esto es un trabajo demasiado tedioso cuando las parcelas tienen una superficie considerable.
- 3) El volumen de vegetación puede cambiar dentro de la línea de cultivo.
- 4) Los resultados de ajuste de dosis en los cultivos producen una tasa de dosis general para toda la parcela, no teniendo en cuenta la variabilidad espacial de los parámetros del dosel.

No obstante, con los avances de la electrónica y la tecnología de la información y comunicación (controladores, actuadores y sensores electrónicos), han propiciado el desarrollo de la agricultura de precisión o agricultura inteligente, basada en la utilización de las TICs en el ámbito de la agricultura. Una de las aplicaciones más prometedoras de la agricultura de precisión consiste en adaptar el volumen de aplicación a la variabilidad espacial de las plantas a tratar, es a partir de aquí cuando los cálculos de masa foliar se van realizando en tiempo real y de manera continua a lo largo de cada una de las hileras de vegetación (Wei y Salyani, et al., 2004 y 2005; A.Escolà, et al., 2013)

Los estudios que hasta ahora se han realizado en relación con la determinación de la masa foliar teniendo en cuenta la variabilidad espacial de la vegetación, centrados en métodos de caracterización electrónica, han utilizado sensores de ultrasonidos, cámaras de visión, sensores de luz infrarroja y escáneres LIDAR (luz pulsada).

Los primeros trabajos en el campo de la medición de masa foliar relacionados con la agricultura de precisión datan de 1981, donde Reichard y Ladda et al. (1981) analizaron los sensores de ultrasonidos para medir el volumen continuo de las hileras de vegetación, estos propusieron un sistema con un mástil vertical de sensores de rango para medir la extensión del árbol, desde el tronco hacia afuera hasta el centro de la fila. El volumen de follaje se calcularía a partir de las medidas tomadas. En este sentido se desarrollaron algunas patentes durante los años 1987-1989 por investigadores como Giles et al. (1989) y Roper et al. (1988). En estos trabajos se constató un ahorro del volumen pulverizado de un 28%-35% en melocotoneros y de un 36%-52% en manzanos, al mismo tiempo que se produjo una reducción de la contaminación por deriva. En cultivos protegidos en invernadero se han llevado a cabo desarrollos de bajo coste basados en sensores sonares de ultrasonidos que detectan las zonas en las que no hay vegetación, cerrando el sistema pulverizador de forma autónoma en estas áreas o en los extremos de las líneas de cultivo (Pawlowski et al., 2017). Pero estos sistemas de activación/desactivación mantienen un caudal constante durante todo el proceso, con lo que no es un sistema de dosificación que se aplique según el estado de la vegetación a tratar.

En otros estudios realizados posteriormente se desarrolló un sistema de dosificación que actuaba aplicando tres tasas de dosis: dosis completa, media dosis y ninguna dosis en función del tamaño de la copa, que fue estimado mediante un sensor de ultrasonidos situado a cada lado del pulverizador, estableciéndose un umbral para cambiar de tasas de dosis completas a medias. El ahorro del volumen pulverizado llegó a ser de hasta un 37% (Moltó et al. 2001)

En sucesivos proyectos de investigación, donde también se plantea como solución tecnológica los sensores de ultrasonidos, se han desarrollado prototipos de pulverizadores de velocidad variable capaces de ajustar la tasa de dosis al tamaño del dosel y la densidad de la vegetación, mediante la

activación y desactivación de grupos de boquillas de una forma no continua (Balsari et al., 2009; Doruchowski et al., 2011).

Además del uso de los sensores de ultrasonidos como equipos de medida de la masa foliar, se han llevado a cabo investigaciones con otros sensores como son los infrarrojos, centrandó su estudio en el reconocimiento de objetos usando la inteligencia artificial. He et al. (2011) utilizaron tres sensores de infrarrojos para la detección de las formas del dosel en la parte alta, media y baja de los árboles usando las técnicas de detección automática de objetivos, electrostática y pulverización asistida por aire.

Usando estos mismos tipos de sensores se ha desarrollado un sistema de detección de reflexión del infrarrojo cercano para detectar plantas mediante metodología de radiometría espectral, permitiendo la identificación de la planta en función de las diferentes características intrínsecas de cada una (Bargen et al., 1993)

Otro tipo de sensores con los que se está trabajando para la detección de la variabilidad espacial en plantas son los sensores LIDAR, estos están basados en el tiempo de vuelo de la luz pulsada, el sensor emite una radiación láser temporalmente modulada a un objetivo que refleja la radiación a un receptor óptico ubicado en un punto. Esta tecnología es la más precisa pero también la más costosa. Algunos investigadores como Wei y Salyani et al. (2005 y 2005) han usado un escáner láser en cítricos con un algoritmo de procesamiento fuera de línea para el escaneo del dosel. En su trabajo basándose en los datos obtenidos del escaneo, calcularon las características del dosel (altura, ancho, volumen, la densidad de vegetación y el perfil del límite del árbol), comprobando que los resultados presentaban una precisión del 97 % para la medición de longitud. Otros autores, con este tipo de sensores han desarrollado trabajos en el campo de la aplicación de productos fitosanitarios con cultivos de melocotones, cítricos, manzanas y uvas obteniendo buenos resultados a la hora de reducir la deriva de la aspersión por el aire y evitar la sedimentación en el suelo (Torrent et al., 2020). De igual forma, se puede citar el desarrollo de un sistema no tripulado de medición de la densidad del dosel para uso a la hora de pulverizar de manera precisa pesticidas, en este caso aplicado a los manzanos (Mahmud., 2021).

Además de los avances realizados con los sensores de ultrasonidos, infrarrojos y LIDAR, en los últimos años está cobrando protagonismo los sistemas de visión artificial. La visión artificial es un método eficiente para proporcionar reconocimiento de la posición de la vegetación, el tamaño, la forma, el color y la información de textura, mediante el uso de una o más cámaras de video, para de esta manera, adquirir imágenes que una computadora debe interpretar. El método usa algoritmos de extracción de contornos para que a partir de estos se puedan definir píxeles de punto de borde (Canny, 1986). Utilizando la tecnología de visión artificial, se desarrolló un pulverizador de huertos que puede aplicar una cantidad específica de pesticidas basados en un dosel verde y aumentar la eficiencia de la aplicación química en las plantaciones de árboles frutales. En el olivar, se evaluó en condiciones de pulverización continuas y discretas a tres velocidades hacia adelante, realizando cuatro repeticiones por cada una de las velocidades. La pulverización selectiva a velocidad variable puede reducir el 54% de la pulverización química con respecto a la pulverización constante convencional (Asaei et al., 2019). Otros autores utilizaron el procesamiento de imágenes para detectar plagas en cultivos agrícolas, obteniendo resultados de hasta un 96% de precisión (Sivasangari et al., 2015).

Hasta ahora todos los estudios y desarrollos mencionados se basan en la utilización de un tipo de sensor para la obtención de los parámetros de la vegetación a tratar, pero diversos autores han descrito trabajos en los que usan lo que denominan “sistemas de fusión de sensores”, que no es ni más ni menos, que el uso de varios tipos de sensores para la obtención de la información integrando los datos obtenidos. Este sistema genera un gran volumen de datos de diferentes resoluciones que se utiliza de forma redundante, ya que en ciertas condiciones hay sensores que envían datos corruptos debido sobre todo a la variación de las condiciones de ruido y desorden y difieren continuamente debido a los cambios temporales en el medio ambiente. Al usar datos procedentes de varios tipos de sensores, así como datos correlacionados de bases de datos relacionadas, se logran mejores precisiones e implicaciones más precisas de lo que se podría lograr mediante el uso de un solo sensor (Dasarathy, et al., 1997). Se están desarrollando estudios de detección de doseles en árboles mediante

algoritmos que permiten su detección y posibilite la discriminación entre estos y objetos que no lo son (postes, espalderas, etc...), basados en la fusión de datos de una cámara, que es la encargada de verificar el color y los bordes paralelos de los troncos de los árboles y de los objetos que no lo son y un escáner láser que detecta los puntos de los bordes, así como el ancho del tronco de los árboles y del resto de objetos. Los algoritmos mediante el uso de la inteligencia artificial ajustan automáticamente los parámetros de detección de color después de cada prueba, lo que redundará en un aumento de la precisión en la detección (Shalal et al, 2015).

1.6. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS.

En primer lugar y según los antecedentes se observa que, para realizar una correcta aplicación de productos fitosanitarios, el parámetro que se debe conocer es la estimación de la masa foliar de forma continua, por tanto, las posibles alternativas para llegar a una buena solución pasarán por el estudio de sensores que permitan obtener los datos necesarios para el cálculo de la masa foliar y a partir de ahí, realizar el análisis y las actuaciones sobre otros elementos del sistema para la aplicación de una dosis óptima en cada momento. Por tanto, los tipos de sensores que puedan dar esa información y estén disponibles en el mercado son: Sensor de ultrasonidos, sensor de infrarrojos, cámara de visión y sensor LIDAR.

1.6.1. Sensores de ultrasonidos.

Los sistemas basados en sensores de ultrasonidos pueden medir distancias de forma rápida y automáticamente. Están basados en el tiempo de vuelo de las ondas del sonido, de manera que el sensor envía una onda de sonido mediante un transmisor y cuando esta rebota en un objeto la onda vuelve, una vez llega al receptor del sensor, este mide el tiempo que ha tardado y en función de la velocidad del sonido se determina la distancia a la que se encuentra el objeto en el que ha rebotado la onda.

Este tipo de sensores tiene una gran fiabilidad y un margen de error pequeño, siempre y cuando el sensor se disponga de forma perpendicular a las ondas. Se debe tener en cuenta a la hora de tomar las medidas que estas son sensibles al ambiente, debido a que la velocidad del sonido cambia con la temperatura. Así lo ideal a la hora de usar estos sensores, sería conectar al sistema un sensor de temperatura, para que en función de los datos que recojan corregir la velocidad a la que viaja el sonido con las características ambientales que concurran en cada momento. La expresión a utilizar para la corrección de la velocidad del sonido en función de la temperatura es:

$$v_s = 331.4 + 0.61 \cdot t$$

Donde v_s es la velocidad del sonido y t la temperatura del aire.

En la atmósfera terrestre la velocidad del sonido es de 343.2 m/s (1235.52 km/h a 20 °C de temperatura, con 50 % de humedad y a nivel del mar).

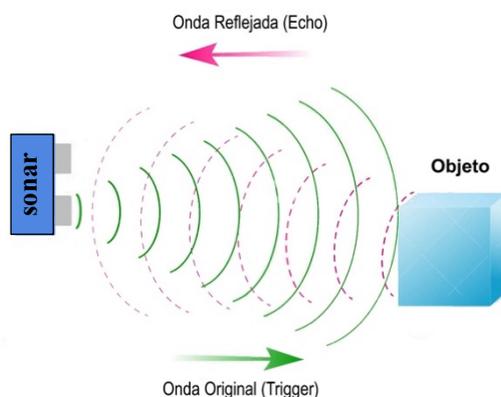


Figura 1. Funcionamiento de un sensor de ultrasonidos. Fuente web: crearobot.es

Ventajas.

- Este sensor, al no necesitar en contacto físico con el objeto al que se quiere medir la distancia, posibilita la detección de objetos frágiles.
- Detecta cualquier material, independientemente del color, sin ajuste ni factor de corrección.
- Los sensores de ultrasonidos son robustos.
- Son de bajo coste.
- Fácil integración con el microcontrolador.

Inconvenientes.

- Estos dispositivos son sensibles a la temperatura y al viento.
- Susceptibles al ruido de fondo.
- Rango de detección limitado.

1.6.2. Sensores de infrarrojos.

Los sensores de infrarrojos están basados en la propiedad que tienen todos los cuerpos a la hora de emitir cierta cantidad de radiación dentro del espectro que está debajo de la luz visible. El sensor infrarrojo transmite y recibe un pulso de luz de alta intensidad para detectar la presencia de objetos en el rango del sensor. El sensor consta de un LED IR y un detector de luz o PSD (Position Sensing Device). Cuando el haz de luz es reflejado por un objeto, el haz reflejado alcanzará el detector de luz y se formará un “punto óptico” en la PSD. Cuando la posición del objeto cambia, también cambia el ángulo del haz reflejado y la posición del punto en la PSD. El sensor tiene un circuito de procesamiento de señales incorporado que procesa la posición del punto óptico en la PSD para determinar la posición (distancia) del objeto reflectante.

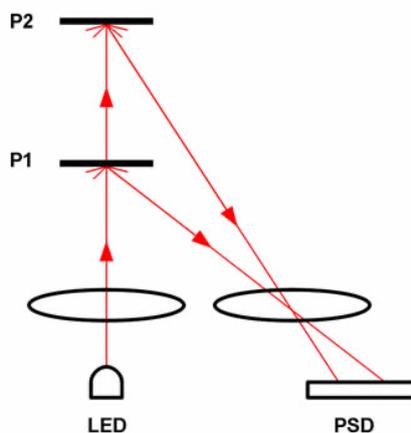


Figura 2. Funcionamiento de un sensor de infrarrojos. Fuente web: <https://proyectosconarduino.com/sensores/sensores-de-distancia-infrarrojos-para-arduino/>

Ventajas:

- Tienen un bajo costo.
- Tiene buen funcionamiento tanto de día como de noche, lo que podría hacerlo interesante para tratamientos nocturnos buscando condiciones ambientales óptimas.
- Bajo consumo de energía.
- No son sensibles a condiciones cambiantes de temperatura ni humedad.

Inconvenientes:

- Tienen un alcance limitado.
- No se puede detectar la información característica del dosel.
- Resolución espacial deficiente para su uso en la agricultura.
- La intensidad de la luz tiene efectos aparentes en la detección.

- Hay plantas que por las características de su dosel no permiten que el haz de luz infrarroja rebote en ellas y por tanto no se puede utilizar para realizar las mediciones.

1.6.3. Sensores LIDAR.

Los sensores LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) son sensores activos, con una tecnología de teledetección basada en un láser; este emite una radiación láser temporalmente modulada a un objetivo que refleja la radiación a un receptor óptico ubicado en un punto. El LIDAR calcula la distancia por el tiempo de vuelo de la luz pulsada. Un mecanismo mecánico con un espejo barre el haz de luz para cubrir la escena requerida en un plano o incluso en tres dimensiones, utilizando un espejo giratorio con la cabeza, de esta manera, el procesador del LIDAR obtiene una nube de puntos del entorno, con la que la computadora procesa una imagen tridimensional en tiempo real, que se actualiza permanentemente y en la que los objetos se desplazan. Lo más importante de esta nube de puntos es que, para cada punto se conoce su posición precisa en el espacio y la distancia que hay hasta él.

Los sensores de alcance láser son muy precisos para calcular distancias, estimándose esta en ± 1 cm en una longitud de 80 m.

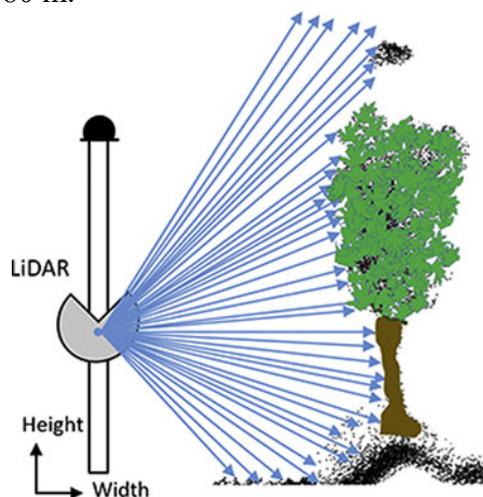


Figura 3. Funcionamiento de un sensor LIDAR. Fuente: Biosystems Engineering, Volumen 200 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511020302944>)

Ventajas:

- Muy buena precisión, lo que permite una muy buena descripción de la estructura de la vegetación.
- Trabajo rápido.
- Se puede usar en cualquier condición de iluminación.
- Información precisa sobre cada punto.
- Reconstruye objetos complejos e irregulares como los que se tratan en el presente proyecto.

Inconvenientes:

- Tienen un alto coste.
- Poca precisión en la detección de bordes.
- Con situaciones climáticas adversas tiene problemas.
- Se necesita un procesador rápido que sea capaz de gestionar todos los puntos y la velocidad con los que los capta.

1.6.4. Cámara de visión.

La visión artificial es un método eficiente para proporcionar reconocimiento de la posición de la vegetación, el tamaño, la forma, el color y la información de textura; el uso de

la visión por computadora en la agricultura mecanizada se está volviendo cada vez más popular. La visión artificial es la capacidad de "ver" de una computadora, para ello se utiliza una o varias cámaras que adquieren imágenes que son transmitidas a un equipo informático para que este, mediante algoritmos basados en inteligencia artificial las procese y extraiga la información que se precisa según las necesidades del proyecto que se este desarrollando.

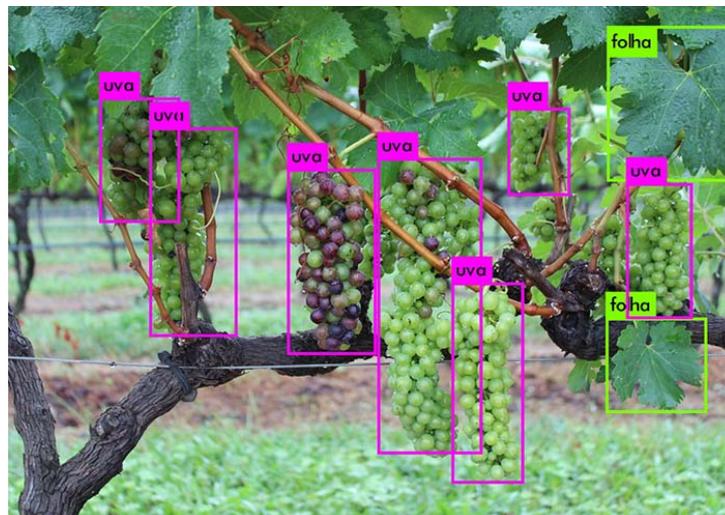


Figura 4. Identificación de partes de una planta mediante visión artificial. Fuente: Embrapa Agricultural Informatics

Ventajas:

- Es un sistema muy robusto para aplicaciones de campo abierto.
- Proporciona una gran cantidad de información (posición de la vegetación, el tamaño, la forma, el color, la información de textura, anomalías en la vegetación producidas por patógenos, excesos/carencias de nutrientes, etc...).
- Proporciona una imagen 3D precisa de los doseles de las plantas.
- Proporciona información sobre la estructura de las plantas con una gran precisión.

Inconvenientes:

- Tienen un alto coste.
- Necesita un equipo para el procesamiento de las imágenes que tenga altas prestaciones para el cálculo.
- Es susceptible a la luz solar directa.
- Necesita procedimiento de calibración y registro adecuados.
- Los algoritmos para el procesamiento de imágenes son complejos y a menudo usan la inteligencia artificial.

Tabla 1. Resumen tipos de sensores analizados. Fuente: Elaboración propia.

Sensor	Descripción	Ventajas	Inconvenientes
Sensores ultrasónicos	Evalúa la distancia de un objeto calculando el tiempo de vuelo de una onda sonora.	<ul style="list-style-type: none"> •Este sensor, al no necesitar el contacto físico con el objeto, ofrece la posibilidad de detectar objetos frágiles. •Detecta cualquier material, independientemente del color, sin ajuste ni factor de corrección. •Los sensores de ultrasonidos son robustos. 	<ul style="list-style-type: none"> •Estos dispositivos son sensibles a la temperatura y al viento. •Susceptibles al ruido de fondo. •Rango de detección limitado.

Sensor	Descripción	Ventajas	Inconvenientes
		<ul style="list-style-type: none"> •Son de bajo coste. •Fácil integración con el microcontrolador. 	
Sensores infrarrojos	Detecta la radiación de luz infrarroja emitida o reflejada por las plantas.	<ul style="list-style-type: none"> •Tienen un bajo costo. •Tiene buen funcionamiento tanto de día como de noche, lo que podría hacerlo interesante para tratamientos nocturnos buscando condiciones ambientales óptimas. •Bajo consumo de energía. •No son sensibles a condiciones cambiantes de temperatura ni humedad. 	<ul style="list-style-type: none"> •Tienen un alcance limitado. •No se puede detectar la información característica del dosel. •Resolución espacial deficiente para su uso en la agricultura. •La intensidad de la luz tiene efectos aparentes en la detección. •Hay plantas que por las características de su dosel no permiten que el haz de luz infrarroja rebote en ellas y por tanto no se puede utilizar para realizar las mediciones.
Sensores LIDAR	Mide la distancia usando el tiempo de vuelo de los rayos láser.	<ul style="list-style-type: none"> •Muy buena precisión, lo que permite una magnífica descripción de la estructura de la vegetación. •Trabajo rápido. •Se puede usar en cualquier condición de iluminación. •Información precisa sobre cada punto. •Reconstruye objetos complejos e irregulares como puede ser en nuestro caso la vegetación. 	<ul style="list-style-type: none"> •Tienen un alto coste. •Poca precisión en la detección de bordes. •Con situaciones climáticas adversas tiene problemas. •Se necesitar un procesador rápido que sea capaz de gestionar todos los puntos y la velocidad de captación.
Visión artificial	Proporciona investigación y análisis automático basado en imágenes para la evaluación, el control y la guía automática de la máquina.	<ul style="list-style-type: none"> •Es un sistema muy robusto para aplicaciones de campo abierto. •Proporciona una gran cantidad de información (posición de la vegetación, el tamaño, la forma, el color, la información de textura, anomalías en la vegetación producidas por patógenos, excesos/carencias de nutrientes, etc...). •Proporciona una imagen 3D precisa de los doseles de las plantas. •Proporciona información sobre la estructura de las plantas con una gran precisión. 	<ul style="list-style-type: none"> •Tienen un alto coste. •Necesita un equipo para el procesamiento de las imágenes que tenga altas prestaciones para el cálculo. •Es susceptible a la luz solar directa. •Necesita procedimiento de calibración y registro adecuados. •Los algoritmos para el procesamiento de imágenes son complejos y a menudo usan la inteligencia artificial.

1.7. SOLUCION TECNOLÓGICA ELEGIDA.

Como se ha descrito en los objetivos, se pretende desarrollar e implementar un sistema que permita variar el volumen de aplicación de solución fitosanitaria de forma continua y en tiempo real en cultivos hortícolas en invernadero, de acuerdo con una señal de control externa basada en el cálculo de la masa foliar de la vegetación.

En este contexto, con los antecedentes indicados y una vez estudiadas las opciones disponibles para la adquisición de datos previa a la toma de decisiones, se ha determinado cual de estos equipos se ajusta más a los objetivos que se han propuesto en este proyecto, con la siguiente justificación:

- Un objetivo planteado en el proyecto es que el sistema sea de bajo coste. Por tanto, se observa en las características de los sensores indicados como, tanto los que están basados en cámaras de visión artificial como los sensores LIDAR, son caros, no solo por el sensor en sí, sino por el equipamiento y software que estos tienen que llevar unido para que realice las funciones requeridas. Si bien, estos sensores su precisión es muy superior a los demás, esa precisión no es tan determinante a la hora de la aplicación de fitosanitarios, puesto que las boquillas que se utilizan ocupan un ancho de trabajo de 50 cm aproximadamente, con lo que dentro de esa franja aunque se detecten diferentes puntos, los cálculos se deben realizar basándose en el punto cuya medida de la máxima masa foliar.
- Del resto de sensores indicados, infrarrojos y ultrasonidos, analizadas las características de ambos, se observa que los sensores de infrarrojos tienen como principal inconveniente la no detección de aquellas plantas que por las características de su dosel no permiten que el haz de luz infrarroja rebote en ellas y por tanto no es posible su utilización para realizar las mediciones en el dosel que forma la vegetación del invernadero.

Por tanto, se ha optado para la realización de este proyecto por los sensores de ultrasonidos para la medida de la masa foliar, debido a su robustez, fiabilidad, y a que ofrecen una precisión adecuada de las medidas que se pretenden realizar, sin olvidar, el precio bajo que tienen algunos de estos en el mercado. El único inconveniente que se aprecia es su sensibilidad a cambios ambientales, sobre todo de temperatura, pero como su ámbito de trabajo va a ser en el interior de los invernaderos, las condiciones ambientales están controladas, aunque se puede pensar en incorporar al sistema un sensor de temperatura para corregir de esta forma los cálculos en las mediciones.

1.8. FUNDAMENTOS TEORICOS PARA EL CÁLCULO DE LA DOSIS.

El cálculo de la dosis se ha llevado a cabo siguiendo el método de TRV (Tree Row Volume) desarrollado por Byers et al. (1971), este método permite ajustar el caldo que se gasta, para una plaga y un cultivo concreto en función del volumen foliar, tratando la vegetación con la máxima eficacia y el mínimo impacto ambiental. Sus unidades son los litros de caldo fitosanitario por metro cúbico de volumen de vegetación. La mezcla previamente se prepara a la concentración recomendada en la etiqueta del envase, expresado en %, gramos por litro, centímetros cúbicos por litro, etc... Los productos fitosanitarios incorporan para una buena eficacia, y cada vez con más frecuencia, datos relativos a la dosis por TRV, tamaño de gota y/o grado de cobertura.



Figura 5. Vegetación que se mide para el cálculo del TRV. Fuente: Elaboración propia.

Para calcular el volumen de vegetación en una hectárea, en nuestro caso PRV, es preciso conocer (Figura 6):

- La altura de las plantas (h): esta medida corresponde a la altura de la vegetación, en el sistema se ha previsto que no supere los 2 m, de ahí que se han dispuesto cuatro sensores de ultrasonidos separados entre sí una distancia en vertical de 50 cm.
- Ancho: Se determina mediante el valor conocido de la distancia que hay entre filas, la mitad del ancho del vehículo donde se ha montado el sistema de pulverización y la distancia que mide el sensor de ultrasonidos.

En el cálculo, se considera sólo la vegetación que está en el lado de la fila a tratar, que es la que condiciona en cada instante la dosis a aplicar, ya que se pasa por ambos lados de la fila.

La expresión para su cálculo es:

$$\text{Ancho} = D - e_i - d_i$$

Donde D es la distancia desde la fila al centro del pasillo,

e_i la mitad del ancho de la maquina pulverizadora,

d_i la distancia que mide el sensor de ultrasonidos.

- Distancia desde la fila al centro del pasillo hasta la línea central de cultivo (D): Esta media es conocida y se realiza manualmente, se debe de hacer varias medidas para obtener un valor lo más exacto posible.

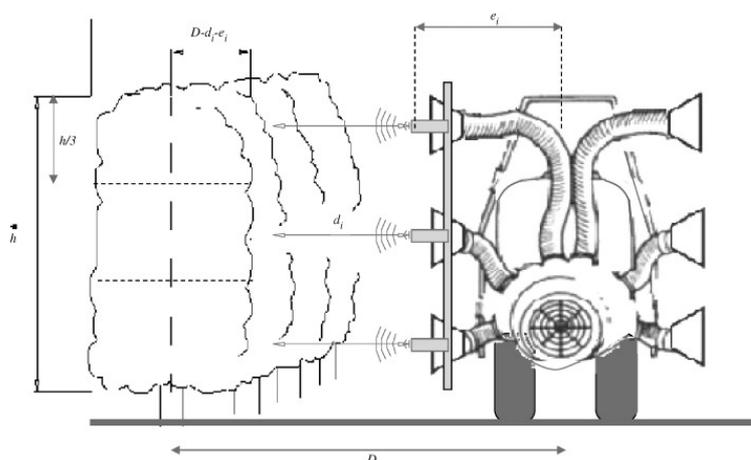


Figura 6. Medidas a realizar en un invernadero para calcular el volumen de vegetación. Fuente: Recuperado del artículo "Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors" (Gil, et al., August 2007)

Una vez el sistema ha determinado las medias, se calcula el PRV (Plant Row Volume), según la expresión matemática adaptada a 4 sensores (Sánchez-Hermosilla, et al., 2013):

$$PRV \left(\frac{m^3}{ha.} \right) = \frac{(A_1 + A_2 + A_3 + A_4)(m) * h(m) * 10000 \left(\frac{m^2}{ha.} \right)}{4 * D (m)}$$

Donde:

A_1, A_2, A_3, A_4 son los anchos de vegetación que detectan cada uno de los sensores de ultrasonidos.

h la altura de la vegetación (En nuestro caso, 2 metros).

D distancia desde la fila al centro del pasillo hasta la línea central de cultivo.

Una vez conocido el valor de la tasa de volumen de vegetación, y con el apoyo de los modelos de estimación que se han desarrollado sobre todo en el cultivo del tomate (Sánchez-Hermosilla, et al., 2013), se puede estimar el volumen de aplicación en litros de caldo por hectárea que le corresponde a un PRV determinado y ya calculado y por tanto, conocido. Los cálculos están basados

en la deposición media de las gotas procedentes de la pulverización sobre las hojas y el sistema utilizado para llevar a cabo la aplicación. La expresión de referencia es:

$$V \left(\frac{l}{ha} \right) = \frac{7 * 10^{-3} * d_v \left(\frac{\mu l}{cm^2} \right) * PRV \left(\frac{m^3}{ha} \right)^{1,25}}{\varepsilon}$$

Donde:

d_v es la deposición media de las gotas de pulverización sobre las hojas. La deposición media de referencia utilizada es 1,15 $\mu l/cm^2$.

PRV es el volumen de vegetación por unidad de superficie.

ε es la tasa de recuperación según el equipo utilizado (60% para pistola pulverizadora y 80% para barra vertical)

Ahora bien, a partir del valor obtenido de PRV se utiliza para transformar la tasa de aplicación constante (l/ha) de la aplicación convencional, en una tasa de volumen constante por unidad de volumen de vegetación basada en la estructura del cultivo, siguiendo la expresión:

$$i \left(\frac{l}{m^3} \right) = \frac{V \left(\frac{l}{ha} \right)}{PRV \left(\frac{m^3}{ha} \right)}$$

Donde

i es la tasa de volumen de pulverización establecida por unidad de volumen de vegetación.

V el volumen de caldo suministrado en litros por hectárea

PRV la tasa de volumen de vegetación.

Manteniendo la relación i como objetivo, el caudal de las boquillas se modifica continuamente de acuerdo con las variaciones de ancho de cultivo medido por los sensores de ultrasonidos.

En el sistema desarrollado el cálculo del volumen de vegetación por unidad de superficie (PRV), para aplicar la tasa de volumen de pulverización, se ha determinado mediante la altura y la anchura de la vegetación y la longitud de la línea de cultivo, que se calcula con la media de las medidas de los sensores de ultrasonidos realizadas durante cinco ciclos, por tanto, como cada ciclo tarda 140 ms en completarse (35 ms cada sensor por medida en tiempos diferentes, dado que para no producir interferencias entre ellos no se pueden realizar medidas simultaneas), los cinco ciclos tardarán 700 ms, que con un avance teórico del vehículo de 1.3 m/s se tiene que durante este tiempo el vehículo recorre 0,91 m.

Con esto se han seleccionado, conforme el avance del vehículo franjas verticales de 0,91 m., donde se calcula la masa foliar y se acciona sobre la válvula proporcional para regular el caudal necesario y aplicar la dosis correcta.

La justificación de porqué se seleccionan cinco ciclos es que al trabajar una pared continua de vegetación esta no presenta grandes variaciones en pequeñas distancias y debido a que la maniobrabilidad de la electroválvula que regula el flujo es relativamente lenta (7 seg.) no se tiene que estar constantemente actuando sobre ella para garantizar el caudal necesario.

Con el cálculo de tasa de volumen de pulverización (i) y los m^3 de vegetación se obtiene el volumen de caldo que se aplica en una franja de vegetación determinada. Con este volumen de caldo calculado, y sabiendo el tiempo en el que se aplica (0.7 seg.), se obtiene el caudal en l/min a suministrar durante ese periodo de tiempo.

¿Cómo se aplica el nuevo caudal calculado?

Para llevar a cabo la aplicación de este caudal se controla la presión del circuito. Para ello, el sistema calcula el cambio de presión con el nuevo caudal atendiendo a la siguiente expresión:

$$\frac{Q_1^2}{Q_2^2} = \frac{P_1}{P_2}$$

Donde Q_1 caudal que se está suministrando (se obtiene del caudalímetro que está instalado en el sistema).

Q_2 nuevo caudal a aplicar
 P_1 presión actual (se obtiene del sensor de presión instalado en el sistema)
 P_2 presión nueva a aplicar

Despejando, la expresión para el cálculo de la presión del circuito en función del caudal a suministrar en cada momento queda:

$$P_2 = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^2 * P_1$$

Donde Q_1 caudal que se está suministrando (se obtiene del caudalímetro que está instalado en el sistema).

Q_2 nuevo caudal a aplicar
 P_1 presión actual (se obtiene del sensor de presión instalado en el sistema)
 P_2 presión nueva a aplicar

¿Por qué se determinan franjas de vegetación verticales cuando aparentemente el sistema es más preciso si los cálculos se hacen por franjas horizontales?

Se ha optado por calcular la dosis necesaria por franjas verticales y no horizontales, por que en el segundo caso es necesario la sustitución de las electroválvulas portaboquillas on/off por electroválvulas que permitan una regulación proporcional, bien por pulsos muy rápidos y continuos (PWM), o bien por inversión de la polaridad para que genere un cambio de giro en el motor que realiza la apertura y cierre. Las electroválvulas proporcionales son mucho más costosas que las de On/Off, por tanto el proyecto se ve bastante encarecido si se decide optar por ellas, perdiendo el objetivo de implementar un sistema de bajo coste. Así, de la forma seleccionada únicamente es necesario una electroválvula proporcional por barra de pulverización.

2. FASES Y CRONOGRAMA

FASES Y CRONOGRAMA

Las fases en las que se ha dividido el presente proyecto son las siguientes:

1. Análisis y evaluación en laboratorio de los sensores de bajo coste más adecuados para la detección de la vegetación.

Esta fase, es quizá la más delicada porque dependiendo de las decisiones que se tomen en ella facilita más o menos la implementación del sistema. Si se toma una mala decisión se tienen que redoblar esfuerzos para abortar la decisión errónea y reconducir el proyecto, con el consiguiente incremento de tiempo que se le dedica.

Durante esta fase se han realizado las siguientes tareas:

- 1.1. Documentación sobre que desarrollos hay relacionados con el presente estudio:
 - Dónde se han llevado a cabo.
 - A qué tipo de vegetación van dedicados.
 - Tecnología empleada para llevarlos a cabo.
 - Problemas surgidos durante el desarrollo de esos estudios y que resultados se han obtenido.
- 1.2. En función de lo anterior, toma de decisión del material tecnológico para la detección de la vegetación que se ha utilizado en la solución.
- 1.3. Búsqueda y contacto con las empresas encargadas de distribuir el material seleccionado.
- 1.4. Una vez adquirido y recepcionado el material, realización de pruebas en el laboratorio para ver si realmente cumple con las expectativas.

2. Selección de los diferentes elementos del sistema de control.

Una vez que se comprobó que el tipo de sensor seleccionado para la detección de la vegetación es el que mejor se adapta al sistema diseñado, se seleccionaron los elementos que van a controlar las entradas de los sensores y manipular los actuadores del sistema. Estos elementos son:

- Placa controladora y/o placas de procesamiento de la información.
- Actuadores que van a operar en función de las señales de entrada que obtenga el sistema (electroválvulas).
- Elementos electrónicos de medida y control que tienen como misión informar del estado del sistema y de si las actuaciones llevadas a cabo son correctas (caudalímetros y sensores de presión).
- Elementos necesarios para la realización de las maniobras en los actuadores (relés).
- Elementos de protección del sistema (cajas estancas para ubicar los componentes).

3. Implementación y desarrollo del sistema de control.

La fase de implementación y desarrollo se divide en dos:

- 3.1. Ensamblaje de todos los elementos de los que está compuesto el sistema.
- 3.2. Diseño e implementación del código fuente correspondiente al algoritmo que permita, a través del controlador, gestionar los distintos elementos que lo componen para la consecución del objetivo planteado.

4. Evaluación del sistema de control sobre un vehículo pulverizador.

Una vez todo funcionando sobre la mesa del laboratorio, se monta el prototipo en el vehículo pulverizador y comienza la realización de las pruebas de campo. Previo a los ensayos finales se hicieron pequeñas pruebas que permitió el ajuste de la electrónica y el software para su correcto funcionamiento.

Los ensayos finales de campo en principio se pensaron en realizar en un invernadero con cultivo real, pero debido a las restricciones ocasionadas por la COVID-19, estos no han sido posible realizarlos con cultivo real, pero en cambio, se ha optado por simular la pared de vegetación que encontramos en los invernaderos, mediante unas mallas de color verde unidas

a unos mástiles de acero con contrapesos en la base. Estos ensayos se han realizado en el interior de las naves que hay en la Universidad de Almería.

Hechos los ensayos experimentales se recopilieron los datos aportados por el sistema para su análisis y comparativa entre sí. Se observaron las diferencias que hay entre los distintos ensayos y se discutió sobre las causas más probables.

5. Desarrollo de la memoria técnica.

Por último, se ha desarrollado el presente documento a modo de proyecto técnico-experimental donde se recoge todas y cada una de las fases por las que ha pasado el desarrollo del prototipo, explicando las actuaciones, conceptos y procesos de desarrollo, materiales empleados y diseño, así como los resultados obtenidos, un análisis razonado de estos con una conclusión final y por ultimo, las posibles mejoras que se pueden llevar a cabo.

Tabla 2. Cronograma temporal de las fases de desarrollo del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

FASES DE DESARROLLO	DURACIÓN (Semanas)	
Análisis y evaluación en laboratorio de los sensores de bajo coste más adecuados para la detección de la vegetación.	4,5	
Selección de los diferentes elementos del sistema de control (electroválvulas, placas, sensores, ...).	3	
Implementación y desarrollo del sistema de control.	7	
Evaluación del sistema de control sobre un vehículo pulverizador.	1,5	
Desarrollo de la memoria técnica	2	

COMPETENCIAS

3. EXPLICACIÓN DE INCORPORACIÓN DE COMPETENCIAS

Las competencias que se integran en este proyecto son:

1. Competencias de los Módulos de Formación Básica y Común a la Rama Agrícola.

1.1. **E-CB03**– Conocimientos básicos sobre el uso y programación de los ordenadores, sistemas operativos, bases de datos y programas informáticos con aplicación en ingeniería.

Esta competencia es muy importante para el desarrollo del proyecto, ya que parte del mismo se basa en la realización de un software que permita la integración de los sensores que captan la información del exterior con los actuadores que realizan las acciones, a través de la incorporación de ese software en un microcontrolador encargado de gestionarlo.

La realización del software conlleva el conocimiento en lenguajes de programación informática, es este caso C++, así como el manejo de sistemas operativos y aplicaciones que sirvan de interfaz para el desarrollo y su posterior volcado a los elementos hardware que integran el sistema.

1.2. **E-CB05**– Comprensión y dominio de los conceptos básicos sobre las leyes generales de la mecánica, termodinámica, campos, y ondas y electromagnetismo y su aplicación para la resolución de problemas propios de la ingeniería.

Para la correcta comprensión del funcionamiento del sistema y su posterior puesta en marcha, ha sido necesario tener dominio sobre conceptos de:

- Mecánica (conocimiento y aplicación de las leyes de la cinemática).
- Hidráulica (conocimiento y aplicación de las leyes de los fluidos).
- Electrotecnia (conocimiento y aplicación de las principales leyes que rigen la electricidad en corriente continua).

2. Competencias de los Módulos de Tecnología Específicas: Módulo de Tecnología Específica de Mecanización y Construcciones Rurales.

2.1. **CTM01**– Capacidad para conocer, comprender y utilizar los principios de Tecnologías de la producción vegetal y animal: Fitotecnia; Biotecnología y mejora vegetal; Cultivos; Protección de cultivos; Jardinería y Paisajismo. Espacios deportivos.

La salud vegetal de las plantas cultivadas no sólo está condicionada por la mejora vegetal, sino que también tiene mucho que ver con el manejo que el ser humano realiza del cultivo, es ahí donde en el sistema desarrollado se introduce la fitotecnia y la protección de cultivos, siendo necesario saber como se deben aplicar los productos fitosanitarios, las condiciones, cantidades, presiones de trabajo, tipos de pulverización, velocidades de trabajo, valores de deposición sobre el dosel de la vegetación, etc....

2.2. **CTM04**– Capacidad para conocer, comprender y utilizar los principios de Mecanización agraria: Motores y máquinas agrícolas. Características y diseño de maquinaria para instalaciones agrarias. Automática agraria.

Esta competencia junto con la E-CB03, tienen un papel mas relevante en el desarrollo del sistema desarrollado. Es debido a que en el proyecto desarrollado hay una parte automática y otra de adaptación a maquinaria, por tanto sin las habilidades desarrolladas durante el grado en materia de conocimiento de las características y diseño de maquinaria para instalaciones agrarias, como son los elementos aplicadores de productos fitosanitarios (bombas hidráulicas, boquillas, válvulas, electroválvulas, manómetros), así como las desarrolladas con la formación en automática agraria, es inviable abordar un proyecto de este estilo.

De igual forma, esta competencia es la que habilita la comprensión del funcionamiento del vehículo en el que va acoplado el sistema de pulverización desarrollado y su interacción tanto rueda-suelo como con los elementos auxiliares que se le acoplan (cubas de arrastre o suspendidas para el tratamiento fitosanitario, aperos, remolques, ...), sin esas nociones el sistema no puede tener una completa integración y algunas de las funciones para las que está programado no llegan a funcionar al 100% o simplemente no funcionan.

4. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS,
ESPECIFICACIONES, DISEÑO Y MÉTODOS.

REQUERIMIENTOS TÉCNICOS, ESPECIFICACIONES, DISEÑO Y MÉTODOS

4.1. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS Y ESPECIFICACIONES.

Se define, en el presente proyecto, como requerimientos técnicos, todo aquel material que se haya utilizado para el diseño e implementación, en base al esquema de funcionamiento que se muestra en la Figura 7, y que se detallan a continuación uno a uno indicando sus especificaciones:

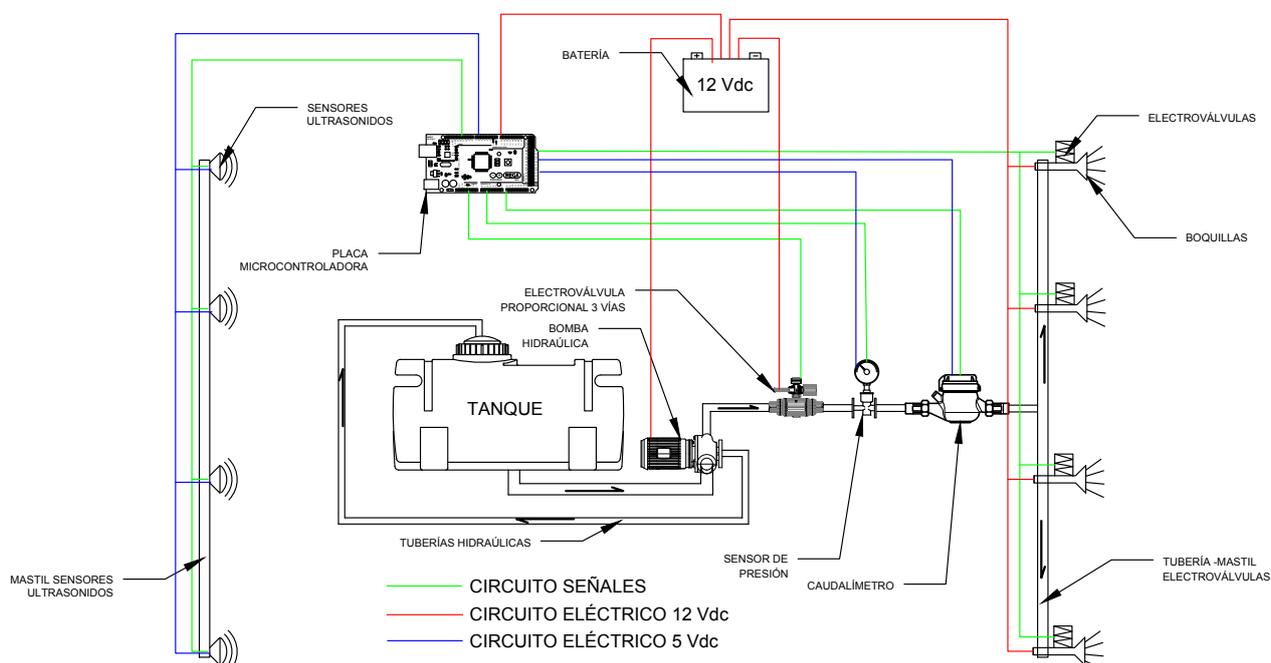


Figura 7. Esquema general del sistema de pulverización. Fuente: Elaboración propia.

4.1.1. Vehículo autopropulsado.

Un requerimiento del sistema es el vehículo autopropulsado donde poder acoplar el sistema de pulverización que se ha diseñado. Este debe de tener un motor, que bien puede ser eléctrico o de combustión, y lo suficientemente potente con transmisión a las cuatro ruedas para poder ejercer una fuerza de tracción capaz de vencer la resistencia de rodadura que ofrece este tipo de terrenos y no provocar un deslizamiento excesivo, permitiendo trabajar de forma eficiente en los suelos enarenados de los invernaderos a una velocidad establecida de ≈ 1.3 m/s (velocidades inferiores no justificarían el uso del mismo, con respecto al ahorro de tiempo, en comparación con la aplicación con pistola), que al estar estos provistos de una capa de arena suelta de unos 10 cm de espesor, hace que la tracción de estos vehículos sea fundamental y más aun si cabe, cuando tienen que llevar arrastrando o acoplado encima un tanque con unos 500 litros aproximadamente de capacidad, destinado a albergar la solución acuosa para el tratamiento que se vaya a aplicar.

En el presente proyecto como vehículo autopropulsado donde instalaremos el sistema de pulverización, se ha utilizado un vehículo comercial llamado Tizona, que ha sido diseñado para trabajar en los invernaderos por la empresa Carretillas Amate S.L., Almería (España) en colaboración con la Universidad de Almería.

Características técnicas:

DIMENSIONES	
Longitud	2.630 mm.
Anchura	800 mm.
Altura	2000 mm.
Peso en vacío	560 kg.
Capacidad	500 L.

ESPECIFICACIONES	
TIPO DE MOTOR /CILINDROS	Lombardini 1404/4
POTENCIA/REFRIGERACION	35 cv/Agua
SISTEMA DE MOVIMIENTO	Hidráulico
TRACCION	4x4 Total
RADIO DE GIRO	1,2 m.
VELOCIDAD MAXIMA	8 km/h

Otras características:

- Sistema de control de velocidad regulable, variable dependiendo de la necesidad de trabajo.
- Articulación central para el óptimo movimiento dentro del invernadero.
- Protección antivuelco.
- Sistema de pulverización formado por una electrobomba APS 51 con motor hidráulico directo, con la que se obtiene un caudal máximo de 49 l/min y una presión máxima de 40 bar.
- El control de mandos tiene un selector de movimiento (atrás/adelante), llave de encendido e indicador digital de revoluciones por minuto (RPM), pulsador de pulverización, pulsador de luz, emergencia y claxon.
- Los neumáticos están compuestos por una llanta metálica reforzada con díselo de tracción total y unas dimensiones de 21x12-8.
- Todo ello lo convierten en un vehículo con una alta maniobrabilidad y facilidad de manejo.



Figura 8. Tizona 35, diseño y fabricación Carretillas Amate S.L. Fuente: <https://www.carretillasamate.com/tizona-35/38-tizona-35.html>

4.1.2. Tarjeta controladora/autómata/PLC.

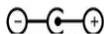
La tarjeta que se ha usado para controlar y relacionar las entradas y las salidas del sistema, está basada en hardware y software libre (donde las disposiciones y diagramas de la tarjeta son de acceso público, del mismo modo y en referencia al software, el código está disponible para acceso público y se puede utilizar y modificar).

El proyecto de Arduino nació en 2003, cuando varios estudiantes del Instituto de Diseño Interactivo de Ivrea, Italia, desarrollaron una placa con todos los elementos necesarios para conectar periféricos a las entradas y salidas de un microcontrolador, que

puede ser programada en los distintos sistemas operativos. El microcontrolador de la placa es ATMEL, y es el encargado de procesar la información que recibe de la interfaz de entrada, para posteriormente enviarla a la interfaz de salida.

En este proyecto, se ha optado por usar una placa basada en Arduino, pero de bajo coste ELEGOO UNO R3.

Características técnicas:

Microcontrolador	ATmega328
Voltaje de funcionamiento	5 V 7-12 V
Voltaje entrada (recomendado)	6-20 V
Voltaje entrada (limite)	6-20 V
Pins I/O Digitales	14 (6 son de salida PWM)
Pins entrada analógicos	6
Intensidad Pin I/O	40 mA
Intensidad Pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	32 KB de las cuales usadas por:
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Velocidad de reloj	16 MHz
Fuente de alimentación externa	

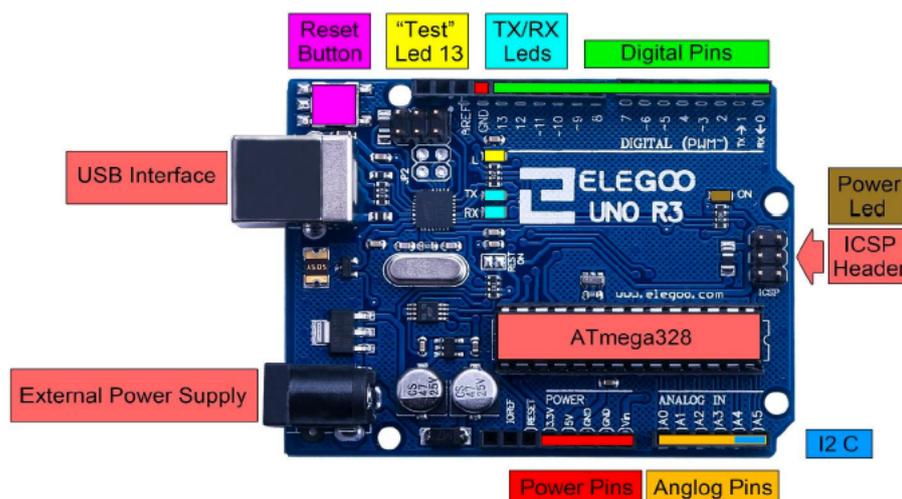


Figura 9. Detalle de la placa ELEGOO UNO R3. Fuente: (ELEGOO Oficial, 2021)

4.1.3. Relés/contactores.

Los relés son unos elementos intermedios de maniobra que permiten accionar actuadores que, por sus características, tienen que trabajar a una tensión y/o tipo de corriente (continua o alterna) distinta de la que proporcionan las salidas del microcontrolador usado, permitiendo así controlar un circuito de salida de mayor potencia que el de entrada.

Los relés elegidos son de la marca WINGONEER® 5PCS modelo KY-019 5V.

Características técnicas:

- ✓ Tipo: Modulo Relevador 5V
- ✓ Modelo: KY-019
- ✓ Señal de control 5 Vdc (algunas módulos pueden funcionar con 3.3V)
- ✓ Tipo de contacto NC (normalmente cerrado) y NO (normalmente abierto)
- ✓ Máxima AC: 10A 250Vac

- ✓ Máximo DC: 10A 30Vdc
- ✓ Dimensiones: 34 mm x 26 mm x 19 mm



Figura 10. Detalle del contactor modelo KY-019. Fuente: Elaboración propia.

4.1.4. Electroválvula proporcional.

Una electroválvula proporcional es aquella que permite regular (infinitas posiciones) el caudal, abriendo o cerrando el orificio de paso mediante un motor de accionamiento eléctrico. La proporcionalidad de la posición viene determinada por una señal de entrada que la controla.

Se ha elegido una electroválvula de la marca ARAG, en concreto el modelo 463022S fabricada por ARAG SRL, Rubiera - Reggio nell'Emilia, Italia.

Características técnicas:

Código fabricante	4630022S
Diámetro (Ø) en milímetros	13 mm
Diámetro (Ø) en pulgadas	1/2"
On / Off @ 90°	7 seg.
Tasa de flujo	60 l/min
Presión máxima	40 bar
Intensidad a 12 V	0.5 A
Fuente de alimentación	12 Vdc

Otras características técnicas:

- ✓ Cuerpo de nailon reforzado con fibra de vidrio.
- ✓ Partes internas en Delrin® y acero inoxidable AISI 303.
- ✓ Juntas de Viton®.
- ✓ Fusible reiniciable interno (desconectando la energía durante 20 segundos).



Figura 11. Electroválvula de tres vías fabricada por Arag SRL cód. 463022S. Fuente: Aragnet.

4.1.5. Sensor de presión.

Un sensor de presión es un instrumento compuesto por un elemento detector de presión con el que se determina la presión real aplicada al sensor (utilizando distintos principios de funcionamiento) y otros componentes que convierten esta información en una señal de salida.

El sensor de presión que se ha seleccionado para este proyecto está fabricado por Seafront y es un sensor de presión analógico de alta precisión con rango de medición 0-10 bar.

Características técnicas:

- Nivel de protección: IP65.
- Voltaje de entrada: $5 \pm 0.25\text{VDC}$ / $5 \sim 32\text{VDC}$.
- Tecnología: Piezoresistencia.
- Conexión por tornillo: G 3/8.
- Señal de salida: Señal analógica.
- Rango de medición: Estará comprendido entre $[0.5-4.5]\text{Vdc}$, donde 0.5 Vdc corresponde a 0 bares de presión y para los 10 bares de presión se tienen 4.5 Vdc de salida.
- Patrón de salida: Presión de sobrecarga de tres cables : 2 veces la presión de rango completo.
- Presión de explosión: 3 veces la presión de rango completo.
- Precisión completa (no linealidad+ repetibilidad + histéresis):
 - $\pm 1\%$ FS (0 ~ 80 °C)
 - $\pm 1.5\%$ FS (-20 ~ 100 °C)
 - $\pm 3\%$ FS (-40 ~ 125)
- Conexión eléctrica: Ajuste para conector Packard (tres núcleos)



Figura 12. Traductor de presión de alta precisión fabricado por SEAFRONT. Fuente: Elaboración propia.

4.1.6. Caudalímetro.

Un caudalímetro es un instrumento para la medida de caudal o el gasto volumétrico de un fluido. Estos aparatos se colocan en línea con la tubería que transporta el fluido y además en una posición completamente horizontal. También suelen llamarse medidores de caudal, medidores de flujo o flujómetros. Existen versiones mecánicas y eléctricas.

En este caso, se ha usado para medir la cantidad de disolución procedente del tanque que se consume en la pulverización. El caudalímetro que se utiliza en el proyecto es del fabricante Thingnovation modelo YF-S201. Consta de un cuerpo de válvula de plástico, un rotor de agua y un sensor de efecto Hall. Cuando el agua fluye a través del rotor, este rueda adaptando su velocidad a las distintas velocidades de flujo, y el imán que hay unido al rotor de agua cuando pasa por el sensor de efecto Hall, emite la señal de pulso correspondiente, que puede ser leído por un microcontrolador o un PLC.

Características técnicas:

- Voltaje de operación: 5V - 18V DC.
- Consumo de corriente: 15mA (5V).
- Capacidad de carga: 10mA (5 VDC).
- Salida: Onda cuadrada pulsante.
- Rango de Flujo: 1-30 l/min.
- Volumen promedio por pulso: 2.25 ml.
- Pulsos por litro: 450.
- Factor de conversión: 7.5.
- Rosca externa: 1/2" NPS.
- Presión de trabajo máx.: 1.75MPa (17 bar).
- Temperatura de funcionamiento: -25°C a 80°C.
- Material: Plástico color negro.



Figura 13. Caudalímetro modelo YF-S201. Fuente: Elaboración propia.

4.1.7. Portaboquillas de pulverización eléctrico.

Un portaboquillas eléctrico es un elemento que consta de un cuerpo para acoplar la boquilla que se utiliza en la pulverización y de un motor eléctrico, que al acoplarse al cuerpo de la boquilla permite, mediante una señal eléctrica, actuar sobre un émbolo abriendo o cerrando el paso del fluido a través de ella.

El portaboquillas elegido es del fabricante ARAG SRL, Rubiera - Reggio nell'Emilia, Italia, modelo número 4064T942.

Especificaciones técnicas:

- ✓ Tensión de alimentación : 10 -15 Vdc
- ✓ Absorción de corriente (solo durante el tiempo de accionamiento) : 0,32 A
- ✓ Tiempo de apertura válvula : 0,2 seg.
- ✓ Tiempo de cierre válvula : 0,5 seg.
- ✓ Presión máx. : 8 bar
- ✓ Caudal @ 0,35 bar: 3,5 l/min
- ✓ Material: Teflón®
- ✓ Conector : 4 polos hembra Tyco Superseal 1.5
- ✓ Temperatura de ejercicio : 0 °C - 60 °C



Figura 14. Portaboquilla penta-jet eléctrico seletron 1/2". Fuente: Elaboración propia.

4.1.8. Boquillas

Los equipos que se suelen emplear en los invernaderos están equipados con boquillas de abanico o de chorro cónico, siendo las primeras las que según estudios realizados (Sánchez-Hermosilla, et al., 2003) ofrecen un mejor funcionamiento y cobertura media en la masa vegetal.

En este proyecto el tipo de boquillas que se ha utilizado son boquillas de chorro plano de rango extendido de la marca Teejet, modelo XR11002-VK, con las siguientes características técnicas extraídas del catálogo de Teejet 51A-ES (recuperado de https://www.teejet.com/CMSImages/TEEJET_ES/documents/catalogs/cat51a-es.pdf):

- Se obtienen muy buenos resultados para tratamiento con herbicidas, fungicidas e insecticidas, tanto sistémicos como de contacto.
- Excelente distribución con un rango amplio de presiones 1-4 bar.
- Ideal para equipos con reguladores de pulverización.
- Reduce la deriva a presiones más bajas, mejor cobertura a presiones más altas.
- Disponibles en acero inoxidable, cerámica y polímero con ángulos de pulverización de 80° y 110° y codificación de colores VisiFlo®.
- Las puntas de cerámica están disponibles con portapuntas de polipropileno anti-corrosivo con codificación de colores VisiFlo en 80°, capacidades 03-08, y en 110°, capacidades 02-08.
- Punta de latón disponible en 110° solamente.
- Alineación automática de la pulverización con tapa y junta 25612-* -NYR Quick TeeJet®.
- Alineación automática de la pulverización para tamaños 10 y 15 con tapa y junta 25610-* -NYR Quick TeeJet®.



Figura 15. Detalle boquilla TeeJet, modelo XR11002-VK. Fuente: Recuperado de https://www.teejet.com/CMSImages/TEEJET_ES/documents/catalogs/cat51a-es.pdf

Tabla 3. Caudales según presión boquilla TeeJet, modelo XR11002-VK. Fuente: Recuperado de https://www.teejet.com/CMSImages/TEEJET_ES/documents/catalogs/cat51a-es.pdf

Tamaño de Gota	TAMAÑO DE GOTA	CAPACIDAD DE UNA BOQUILLA EN l/min	l/ha 50cm																										
			bar	80°		5 km/h		6 km/h		7 km/h		8 km/h		10 km/h		12 km/h		16 km/h		18 km/h		20 km/h		25 km/h		30 km/h		35 km/h	
				M	F	4	5	6	7	8	10	12	16	18	20	25	30	35											
XR8002	1,0	M	M	0,46	138	110	92,0	78,9	69,0	55,2	46,0	34,5	30,7	27,6	22,1	18,4	15,8												
XR11002 (50)	1,5	F	F	0,56	168	134	112	96,0	84,0	67,2	56,0	42,0	37,3	33,6	26,9	22,4	19,2												
	2,0	F	F	0,65	195	156	130	111	97,5	78,0	65,0	48,8	43,3	39,0	31,2	26,0	22,3												
	2,5	F	F	0,72	216	173	144	123	108	86,4	72,0	54,0	48,0	43,2	34,6	28,8	24,7												
	3,0	F	F	0,79	237	190	158	135	119	94,8	79,0	59,3	52,7	47,4	37,9	31,6	27,1												
	4,0	F	F	0,91	273	218	182	156	137	109	91,0	68,3	60,7	54,6	43,7	36,4	31,2												

4.1.9. Sensores de ultrasonidos.

Qué es un sensor de ultrasonidos y para qué se utiliza ya se ha comentado en este documento, como también se ha visto la justificación del porqué se ha tomado la decisión de utilizar esta tecnología para medir la distancia que tenemos desde el equipo de pulverización a la vegetación, y en consecuencia saber el ancho que tiene esta en cada medición.

Para el sistema el sensor de ultrasonidos elegido es el fabricado por DFRobot, modelo JSN-SR04T.

Este sensor de ultrasonidos (JSN-SR04T) permite medir distancias de entre 20 a 350 centímetros aproximadamente. Además es resistente al agua y lo hace ideal para utilizar en proyectos como el que se está abordando, puesto que no se vería afectado en su funcionamiento por gotas procedentes de la pulverización. El sensor es de reducido tamaño y puede ser empotrado. Viene provisto de una placa amplificadora para poder utilizarlo con cualquier microcontrolador.

Características técnicas:

- Alimentación: 3.3 a 5V
- Consumo en reposo: 5mA
- Consumo en funcionamiento: 30mA
- Frecuencia de sonido: 38-50 kHz.
- Rango de distancia: 20 cm a 350 cm (aprox.)
- Resolución: 0.5cm
- Ángulo de detección: $< 70^\circ$
- Temperatura de funcionamiento: -10 a 70°C
- Cable: 2.5m
- Dimensiones: 41 x 28.5 mm
- Peso: 54 gramos



Figura 16. Sensor de ultrasonidos DFRobot, modelo JSN-SR04T (Sensor+placa amplificadora). Fuente: www.digikey.es

4.1. DISEÑO DEL SISTEMA.

4.1.1. INTEGRACIÓN HARDWARE.

Una vez presentados y puesto de manifiesto las características de todos aquellos elementos que se han utilizado para el desarrollo del proyecto, es necesario indicar como se han establecido las relaciones entre ellos, su integración de cada uno dentro del sistema, y las conexiones que estos tienen a nivel eléctrico y de control, en definitiva, establecer el diseño del mismo. En este apartado se desarrolla y detalla todos estos aspectos, para que con la lectura del presente documento se pueda llevar a cabo su implementación.

4.1.1.1. Vehículo autopropulsado.

Para poder incorporar el sistema desarrollado en el vehículo autopropulsado es necesario que en los laterales del depósito en la parte trasera, a ambos lados, se coloquen dos barras huecas por las que va a circular el fluido procedente de la bomba de impulsión situada a la salida del depósito, destinadas a la ubicación de los portaboquillas de pulverización junto con su electroválvula correspondiente, necesarias para el control de dosificación.

El acople de los portaboquillas se ha realizado mediante una abrazadera que incorporan estas de fábrica y para el paso del fluido de la barra al portaboquilla se ha realizado un taladrado de 10 mm de diámetro en la barra por cada uno de los portaboquillas. Estos se encuentran a 50 cm de distancia en vertical uno del otro.

Separadas de estos mástiles portaboquillas una distancia (D_v) de 106 cm más hacia la parte delantera del vehículo, se han ubicado dos mástiles, igualmente uno a cada lado del vehículo, donde se han acoplado los sensores de ultrasonidos para el cálculo del volumen de vegetación. Los sensores se han dispuesto en los mismos planos horizontales que las boquillas de pulverización, relacionando de esta forma un sensor con una boquilla.

4.1.1.2. Relés.

En el sistema desarrollado su uso viene determinado por el control que debemos hacer sobre las electroválvulas, puesto que estas funcionan, tanto la alimentación como el circuito de maniobra de apertura/cierre, con una tensión de 12Vdc, mientras que el microcontrolador (ELEGOO UNO R3), como se ha visto en las características técnicas sólo ofrece tensiones de 3.3Vdc y 5Vdc. Los 12 Vdc requeridos para este tipo de actuadores se han obtenido de una fuente de alimentación auxiliar (batería).

Conexión al microcontrolador:

El relé se alimentará a través de la placa del microcontrolador con 5 Vdc y mediante un pin I/O digital se puede conmutar entre los dos tipos de contactos NO/NC (normalmente abierto/normalmente cerrado), de manera, que cuando el pin tiene tensión (5 Vdc) se activa el contacto NO mediante una bobina y un electroimán, que cierra el contacto, y si no tiene tensión está activo el contacto NC (la bobina en este caso no está energizada).

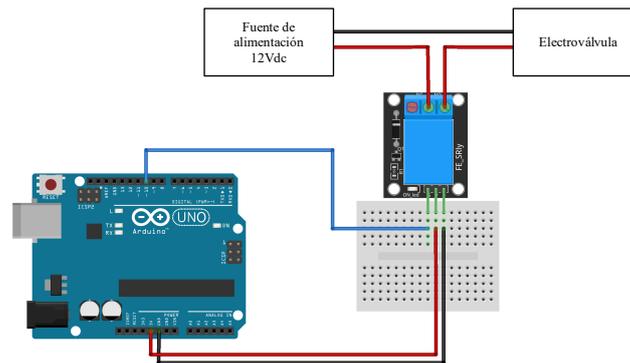


Figura 17. Diagrama de conexión al microcontrolador de un contactor KY-019. Fuente: Recuperado de <https://arduinomodules.info/ky-019-5v-relay-module>

4.1.1.3. Electroválvula proporcional.

La función asignada de esta electroválvula para el sistema desarrollado es la de dejar pasar más o menos caudal a las barras verticales de pulverización, con la intención que regule la presión que se tiene en las boquillas. Manejando esta electroválvula hemos conseguido aplicar la dosis correcta en función del PRV calculado.

Colocación en el circuito hidráulico:

Esta va dispuesta a continuación de la bomba electrohidráulica mediante una manguera que unirá ambas. Se observa que este modelo de electroválvula tiene tres orificios que pueden actuar como entradas y salidas indistintamente. Es este proyecto, sólo se ha utilizado dos de ellos, el otro se ha taponado para mantener una presión estable dentro de todo el circuito. Como entrada se ha utilizado uno de los orificios que no permiten regulación de caudal y como salida hacia las barras pulverizadoras, se utiliza el orificio que si permite la regulación del caudal (orificio vertical), de este modo hemos regulado el caudal que pasa hacia la barra vertical y por consiguiente la presión (Figura 18). La encargada de realizar el retorno al deposito del liquido que no se consume será la bomba hidráulica.

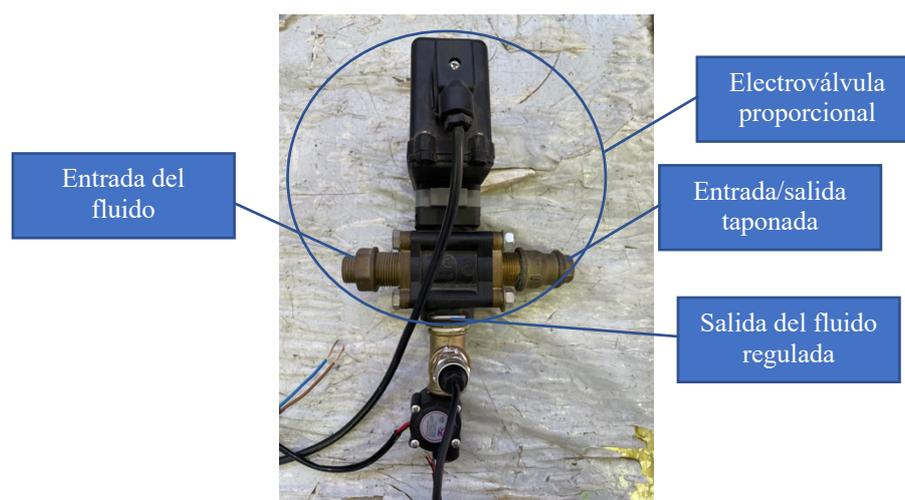


Figura 18. Detalle de la electroválvula proporcional utilizada. Fuente: Elaboración propia.

Conexión al microcontrolador:

Para acoplar la electroválvula al microcontrolador se han usado dos relés, uno para realizar la maniobra de apertura, y otro para realizar la maniobra de cierre, ambos están

alimentados por 5 Vdc (corriente que es provista por la placa del microcontrolador) y se activan mediante sendos pin I/O digitales (*pin 3* para la maniobra de apertura/*pin A1* para la maniobra de cierre) de la placa microcontroladora. Para la alimentación de la electroválvula se ha realizado con un cable de dos hilos procedente directamente de la batería. Y para la maniobra se ha utilizado un cable de un hilo que va desde el polo positivo de la batería (12 Vdc) pasándolo por los relés destinados a la inversión de la polaridad permitiendo la apertura y el cierre (véase Figura 19). Otra cosa que se ha tenido en cuenta a la hora de programar la apertura y cierre de esta electroválvula es el tiempo que tarda en realizar la maniobra, sabiendo este tiempo y el caudal que ofrece cuando esta totalmente abierta, se calcula el tiempo de maniobra en función del caudal que hay que corregir. Aunque se ha observado alguna diferencia cuando los caudales de paso son pequeños, ya que la respuesta de la maniobra a bajos caudales no es directamente proporcional al caudal suministrado. La curva que relaciones el caudal (l/min) con el tiempo no es completamente recta.

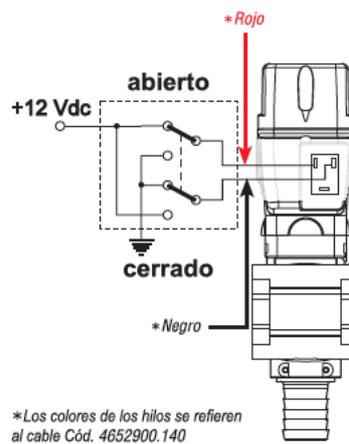


Figura 19. Detalle de conexiones eléctricas para el movimiento de apertura/cierre electroválvula mediante inversión de la polaridad.
 Fuente: Recuperado de www.aragnet.com

4.1.1.4. Sensor de presión.

El sensor de presión en el sistema indica que presión tiene el circuito de pulverización aguas arriba, controlando la presión en las barras de pulverización. Mediante las sucesivas lecturas del sistema de la información que genera este sensor, y sabiendo la presión que en cada momento debe de haber en la barra de pulverización para garantizar una dosis correcta (véase apartado 1.8), se determina las acciones sobre la electroválvula proporcional para la regulación del caudal a la barra y por ende la presión. Una vez, la electroválvula ha regulado el caudal, el sensor de presión constantemente va chequeando la que tiene el sistema para compararla con la calculada, si estas no son iguales el sistema envía información a la electroválvula proporcional para corregirla.

Colocación en el circuito hidráulico:

El sensor de presión ha sido insertado en el circuito hidráulico a continuación de la válvula proporcional, acoplado en una T invertida.

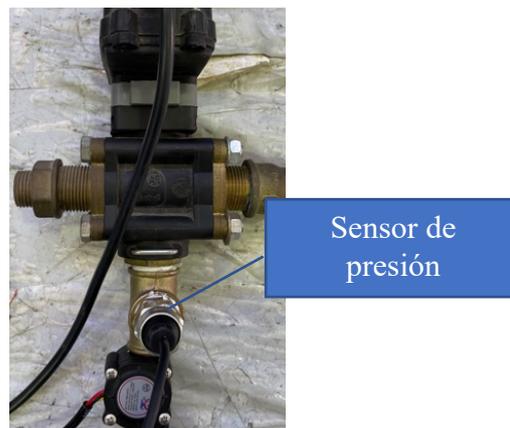


Figura 20. Detalle del sensor de presión acoplado en el circuito. Fuente: Elaboración propia.

Conexión al microcontrolador:

El sensor de presión va alimentado mediante la tarjeta microcontroladora (5 Vdc y GND) y lleva un tercer cable que va conectado a un pin analógico (*pin A0*), encargado este pin de recibir una tensión procedente del sensor que oscila entre 0,5 y 4.5 Vdc, de manera que se establece una relación directamente proporcional entre la tensión que llega al pin analógico del microcontrolador y la presión que hay en el circuito, haciendo corresponder 0 bares con 0,5 Vdc y 10 bares con 4,5 Vdc.

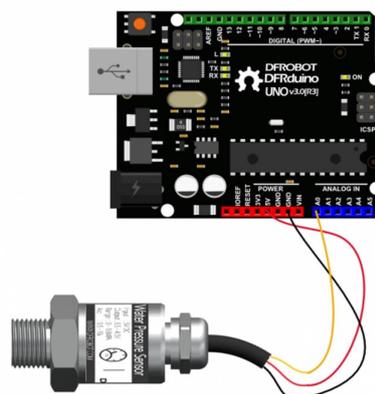


Figura 21. . Diagrama de conexión al microcontrolador del sensor de presión. Fuente: Recuperado de <https://es.aliexpress.com/item/32849969834.html>

4.1.1.5. Caudalímetro

El caudalímetro en este proyecto tiene como misión medir el volumen de disolución que se utiliza en el tratamiento fitosanitario y el caudal instantáneo.

El caudal instantáneo se usa para:

- El cálculo de la nueva presión en función del caudal que se está suministrando, el nuevo caudal a aplicar y la presión actual (véase apartado 1.8).
- Comprobar que la electroválvula proporcional está actuando de forma correcta, comparando el caudal que se está suministrando con el teórico.

Fundamento teórico:

Para el cálculo del volumen de líquido consumido, el microcontrolador va contando los pulsos que el caudalímetro le envía, esa lectura es recogida por la aplicación software, que teniendo en cuenta que cada 450 pulsos es un litro, calcula el volumen de aplicación gastado mediante la siguiente expresión:

$$\text{Volumen (l)} = \frac{n^{\circ} \text{ pulsos contados}}{450 \text{ Pulsos/litro}}$$

Colocación en el circuito hidráulico:

El caudalímetro va insertado en el circuito hidráulico a continuación del sensor de presión en la salida de la T donde este va acoplado, este es importante que se coloque en posición horizontal y hacia arriba, para evitar errores en las medidas.



Figura 22. Detalle de la ubicación del caudalímetro. Fuente: Elaboración propia.

Conexión al microcontrolador:

El caudalímetro va alimentado mediante la tarjeta microcontroladora (5 Vdc y GND) y lleva un tercer cable que va conectado a un pin I/O digital (*pin 2*), los pins que se pueden utilizar son el 2 y el 3, puesto que estos están diseñados como pines digitales de entrada/salida que permiten recibir interrupciones hardware, respondiendo así a eventos físicos ocurridos en ellos, permitiendo detectarlos cuando ocurren. En este caso, se ha configurado para detectar RISING, que se produce cuando el flanco de subida pasa de estado LOW a HIGH, es decir, cuando al pin le llega un pulso de subida.

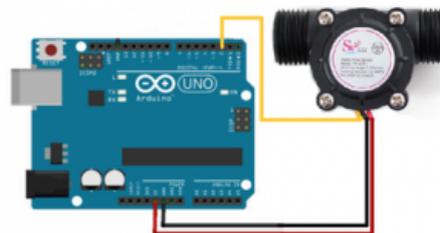


Figura 23. Diagrama de conexión al microcontrolador de un caudalímetro YF-S201. Fuente: Recuperado de <http://chips.mecatronium.com/tutorial-sensor-de-flujo-yf-s201>

4.1.1.6. Portaboquillas

Para la ubicación de las boquillas se ha montado un portaboquillas de pulverización que lleva incorporada una electroválvula on/off para abrir/cerrar el paso del líquido a través de ella, también lleva acopladas un revolver de 5 boquillas anti-goteo permitiendo su selección simplemente girándolo de forma manual previamente al inicio del trabajo.

Colocación en el circuito hidráulico:

Los portaboquillas van conectados en la parte final del circuito hidráulico, colocados sobre las barras verticales, acoplados al orificio que estas tienen para que pase el líquido ($\phi 10$ mm). La sujeción a la barra se ha realizado mediante unas abrazaderas que incorpora el portaboquillas. En cada barra se han colocado cuatro portaboquillas a una distancia de 50 cm.

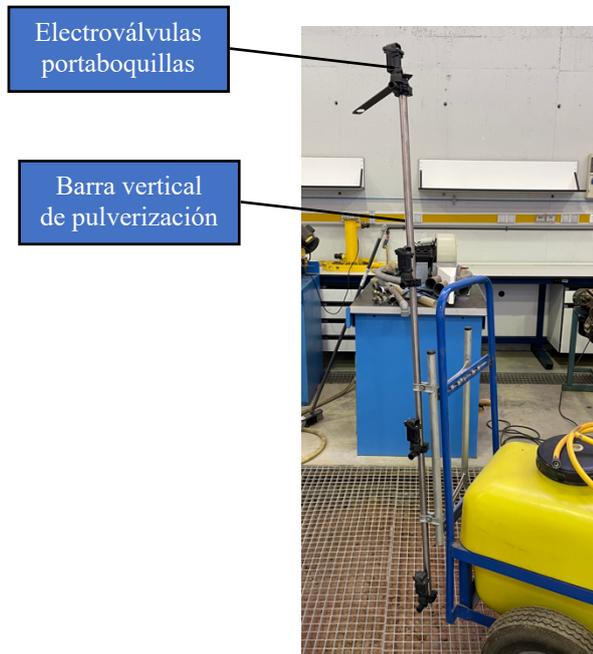


Figura 24. Detalle de la barra portaboquillas. Fuente: Elaboración propia.

Conexión al microcontrolador:

Para acoplar la electroválvula al microcontrolador se ha usado un relé para realizar la maniobra de apertura/cierre, este está alimentado mediante 5 Vdc (corriente que es provista por la placa del microcontrolador) y se activa mediante un pin I/O digital de la placa microcontroladora (Pin usados: A2, A3, A4 y A5, uno para cada electroválvula).

Para la alimentación de la electroválvula se ha conectado desde la batería una manguera de dos hilos llevando uno desde el pin 1 de la electroválvula a masa y desde el pin 2 al positivo de la batería (12 Vdc).

Para poder ejecutar las maniobras de apertura/cierre se usa el pin 4 de la electroválvula, que en este caso, se ha llevado al positivo de la batería (12 Vdc) pasando a través del relé (Figura 25), de manera que actuando sobre el relé mediante la entrada digital a la que esta conectado abre la electroválvula y si se deja de actuar se cierra la electroválvula.

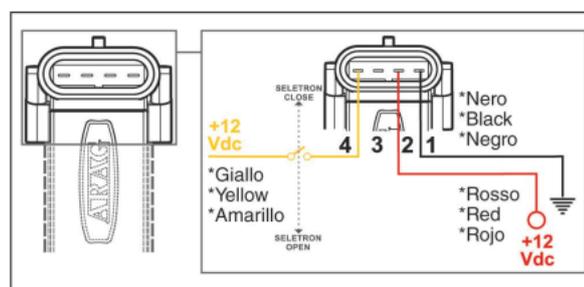


Figura 25. Detalle de conexiones eléctricas para el movimiento de apertura/cierre electroválvula. Fuente: Recuperado de www.aragnet.com

4.1.1.7. Boquillas.

Las boquillas son una parte fundamental del sistema, y su elección requiere de un conocimiento exhaustivo del tipo y de la forma de tratamiento a realizar, ya que estas están influidas directamente por las presiones de trabajo.

Colocación en el circuito hidráulico:

Las boquillas van colocadas en un espacio reservado en el portaboquillas para ellas.

4.1.1.8. Sensor de ultrasonidos.

Fundamento teórico:

Los sensores de ultrasonidos están basados en el tiempo de vuelo de las ondas de sonido. El sensor envía una onda ultrasónica a través del disparador o trigger, rebota contra el objeto y el receptor o eco detecta la onda. Sabiendo cuánto ha tardado en viajar dicha onda, se puede saber la distancia que hay entre el sensor y el objeto.

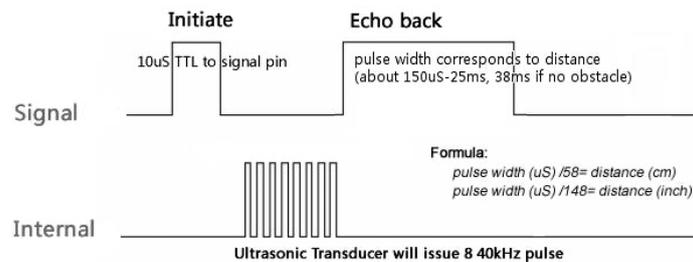


Figura 26. Funcionamiento de un sensor de ultrasonidos DFRobot modelo JSN-SR04T. Fuente: Recuperado de <https://wiki.dfrobot.com>.

El pulso ultrasónico se transmite en el tiempo 0, reflejado por un objeto. El sensor recibe esta señal y la convierte en una señal eléctrica. El siguiente pulso se puede transmitir cuando el eco se desvanece. Este período de tiempo se llama período de ciclo. El período de ciclo recomendado no debe ser inferior a 33 ms. Si se envía un pulso de activación de 10 µs de ancho al pin de señal, el módulo ultrasónico emite ocho señales ultrasónicas de 40 kHz y detecta el eco. La distancia medida es proporcional al ancho del pulso del eco. Si no se detecta ningún obstáculo, el pin de salida dará una señal de alto nivel de 38 ms.

Una vez obtenido por parte del microcontrolador el tiempo que ha tardado la onda de sonido en regresar al sensor después de haber rebotado en el obstáculo, mediante el software diseñado calcula la distancia con la expresión:

$$v = \frac{e}{t} \Rightarrow e = v * t$$

Donde:

- v es la velocidad del sonido (En la atmósfera terrestre es de 343.2 m/s a 20 °C de temperatura, con 50 % de humedad y a nivel del mar),
- e es el espacio en metros.
- t el tiempo en segundos.

Como la distancia que se tiene que medir es pequeña, la unidad de referencia es el cm, y el tiempo que tarda en recorrer el sonido una distancia pequeña es del orden de los microsegundos, que es la unidad en la que el sensor de ultrasonidos calcula el tiempo de vuelo de la onda. Por tanto, la expresión para el cálculo de la distancia aplicando la conversión de unidades queda:

$$e = v * t = 343.2 \frac{m}{s} * \frac{100 \text{ cm}}{m} * \frac{1 \text{ s}}{1000000 \mu s} * t = 0.03432 \frac{cm}{\mu s} * t$$

Ahora como el espacio entre el sensor y el obstáculo lo recorre dos veces (ida y vuelta), el tiempo que se utiliza es la mitad del calculado por el sensor, de manera que:

$$[e] = 0.03432 \frac{cm}{ms} * \frac{t}{2} = [0.01716 * t]$$

Colocación en el sistema de pulverización:

Los sensores de ultrasonidos se han dispuesto en un mástil vertical al que se le han realizado unos taladros que permiten empotrar los sensores en él. La separación que tienen

los sensores entre ellos es de 50 cm (misma que tienen de separación los portaboquillas). El mástil se ha colocado de forma paralela a la barra portaboquillas haciendo coincidir las boquillas y los sensores uno a uno en el mismo plano horizontal.

El mástil con los sensores de ultrasonidos se ha colocado a una distancia D_v (distancia a la barra de pulverización) de 106 cm más adelantada que la barra vertical de pulverización, atendiendo a las siguientes premisas:

- Cada sensor de ultrasonidos de un mismo mástil realiza de forma escalonada una medición cada 35 ms, por tanto, para completar un ciclo donde todos los sensores hayan realizado una medición tiene que transcurrir 140 ms (0,14 seg).
- La velocidad de trabajo de la máquina pulverizadora se establece en 1.3 m/s, ya que con velocidades inferiores no estaría justificado el uso de la misma con respecto al ahorro de tiempo en comparación a la aplicación con pistola.
- Las electroválvulas portaboquillas seleccionadas tienen un tiempo de respuesta para la apertura de 0,2 seg y para el cierre de 0,5 seg.

Por tanto, con las consideraciones anteriores se calcula el espacio que recorre la máquina desde que un sensor toma una lectura hasta que, en el caso hipotético, tenga que completar alguna maniobra (apertura/cierre) la electroválvula portaboquillas asociada.

Esta será:

- Para la maniobra de apertura:

$$v = \frac{e}{t} \Rightarrow e = v * t = 1.3 \frac{m}{s} * (0,140s + 0,2s) = 0.442 m$$

- Para la maniobra de cierre:

$$v = \frac{e}{t} \Rightarrow e = v * t = 1.3 \frac{m}{s} * (0,140s + 0,5s) = 0.832 m$$

Como se puede observar el caso más desfavorable es hasta que se completa la maniobra es en el cierre (donde más espacio recorre la máquina), de ahí que el mástil con los sensores de ultrasonidos se tenga que adelantar con respecto a la barra con los portaboquillas como mínimo 0,832 m., esta distancia es inferior a la calculada en el apartado 1.8, que es de 0,91 m, por tanto, sigue condicionando la distancia D_v la medida obtenida para completar cinco ciclos de tomas de lectura de los sensores de ultrasonidos.

En nuestro caso y por facilidad de anclaje en la estructura del vehículo se ha tomado la decisión de ampliar esta distancia D_v hasta 106 cm., no obstante, a la hora de realizar la programación hay que tener en cuenta las diferencias entre el distanciamiento entre barras y los tiempos necesarios para cada una de las maniobras, aplicando un retraso en la orden de ejecución de maniobra:

- Para la maniobra de apertura:

$$v = \frac{e}{t} \Rightarrow t = \frac{e}{v} = \frac{1.06m - 0.442 m}{1.3 \frac{m}{s}} = 0.475 s$$

- Para la maniobra de cierre:

$$v = \frac{e}{t} \Rightarrow t = \frac{e}{v} = \frac{1.06m - 0.832 m}{1.3 \frac{m}{s}} = 0.175 s$$

Conexión al microcontrolador:

Las conexiones de los sensores de ultrasonidos a la placa microcontroladora, se han realizado de la siguiente forma:

1. Se conecta el sensor de ultrasonidos a la tarjeta amplificadora.
2. La tarjeta amplificadora tiene cuatro patillas de las cuales, una corresponde a la tensión de alimentación positiva que va conectada a la tarjeta controladora en su salida de 5 Vdc. Otra patilla se va a conectar a la salida GND de la placa controladora, y las dos patillas restantes se han conectado a dos I/O digitales de la placa (*pin 4 para el envío*

de la señal y pines 5, 6, 7 y 8 para recepción de la señal, uno por cada sensor), una se utiliza para enviar la señal y la otra para la recepción (Figura 27).

En nuestro caso, al tener conectados cuatro sensores de ultrasonidos por barra, es necesario el uso de 8 I/O digitales de la placa microcontroladora, pero según pruebas realizadas se ha podido comprobar que la entrada correspondiente al envío del “trigger” puede ser común a todos los sensores, siempre y cuando mediante la programación correspondiente se tenga activo para la recepción del “echo” en cada momento sólo un sensor.

También se ha observado que no se pueden realizar las medidas con todos los sensores a la vez, puesto que se producen interferencias entre ellos y las medidas son erróneas, es necesario establecer un intervalo de medida entre un sensor y otro, de como mínimo 33 ms., en nuestro caso, el intervalo seleccionado ha sido de 35 ms., eso hace que para que se produzca un ciclo completo de medidas en una barra tienen que transcurrir 140 ms.

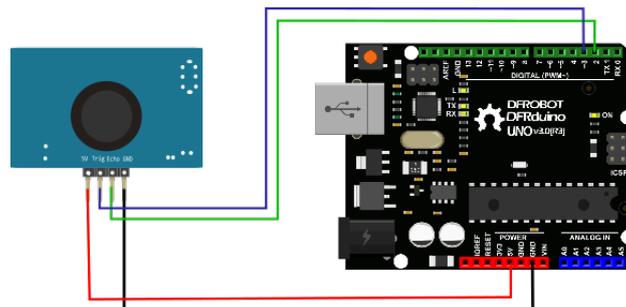


Figura 27. Diagrama de conexión a un microcontrolador de un sensor de ultrasonidos DFRobot, modelo JSN-SR04T. Fuente: Recuperado de <https://wiki.dfrobot.com>

4.1.2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE.

En este apartado, reservado al software, se ha hecho la siguiente diferenciación:

- Por un lado, el entorno de desarrollo necesario para la programación del sistema (microcontrolador, sensores y actuadores).
- Y por otro, el propio software que se ha desarrollado para el funcionamiento del sistema.

4.1.2.1. Entorno de desarrollo.

Para la programación la placa es necesario la descarga, desde de la página web de Arduino, del entorno de desarrollo (IDE). Se dispone de versiones para Windows y MacOS, así como las fuentes para compilarlas en LINUX. La descarga es gratuita ya que la licencia para su uso está encuadrada dentro de licencia libre. La descarga incluye los drivers necesarios para cualquier placa basada en el proyecto Arduino, así como las librerías necesarias para su programación. Bajo mi punto de vista, el IDE presenta un inconveniente que los desarrolladores y/o personas que trabajan con esta aplicación echan en falta, y es que este IDE carece de un depurador¹ (en inglés “debugger”) que facilite, a la hora de programar, la detección de errores, sobre todo en proyectos que tienen una cierta complejidad.

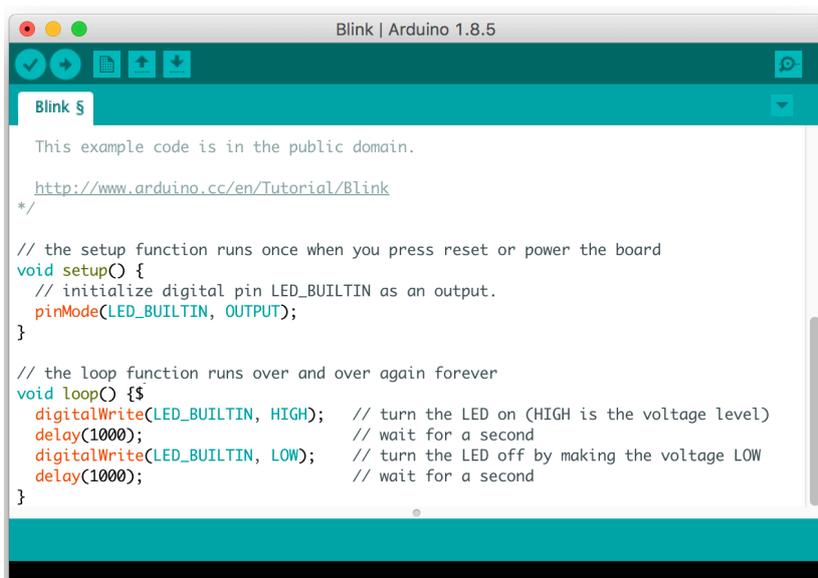


Figura 28. Detalle de la interfaz para programar placas microcontroladoras basadas en Arduino. Fuente: Wikipedia recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Arduino_IDE

4.1.2.2. Software del sistema.

En este apartado se explica la estructura y la organización del software diseñado para el funcionamiento del sistema.

Diagrama de flujo

A continuación y para generar una idea clara al lector de cuales son las funciones del software del sistema, se muestra el flujograma con la lógica de la aplicación donde se identifican los pasos y se ve como trabaja el sistema desde el punto de vista lógico.

¹ Un depurador es un aplicativo usado para probar y eliminar los errores de otros programas.

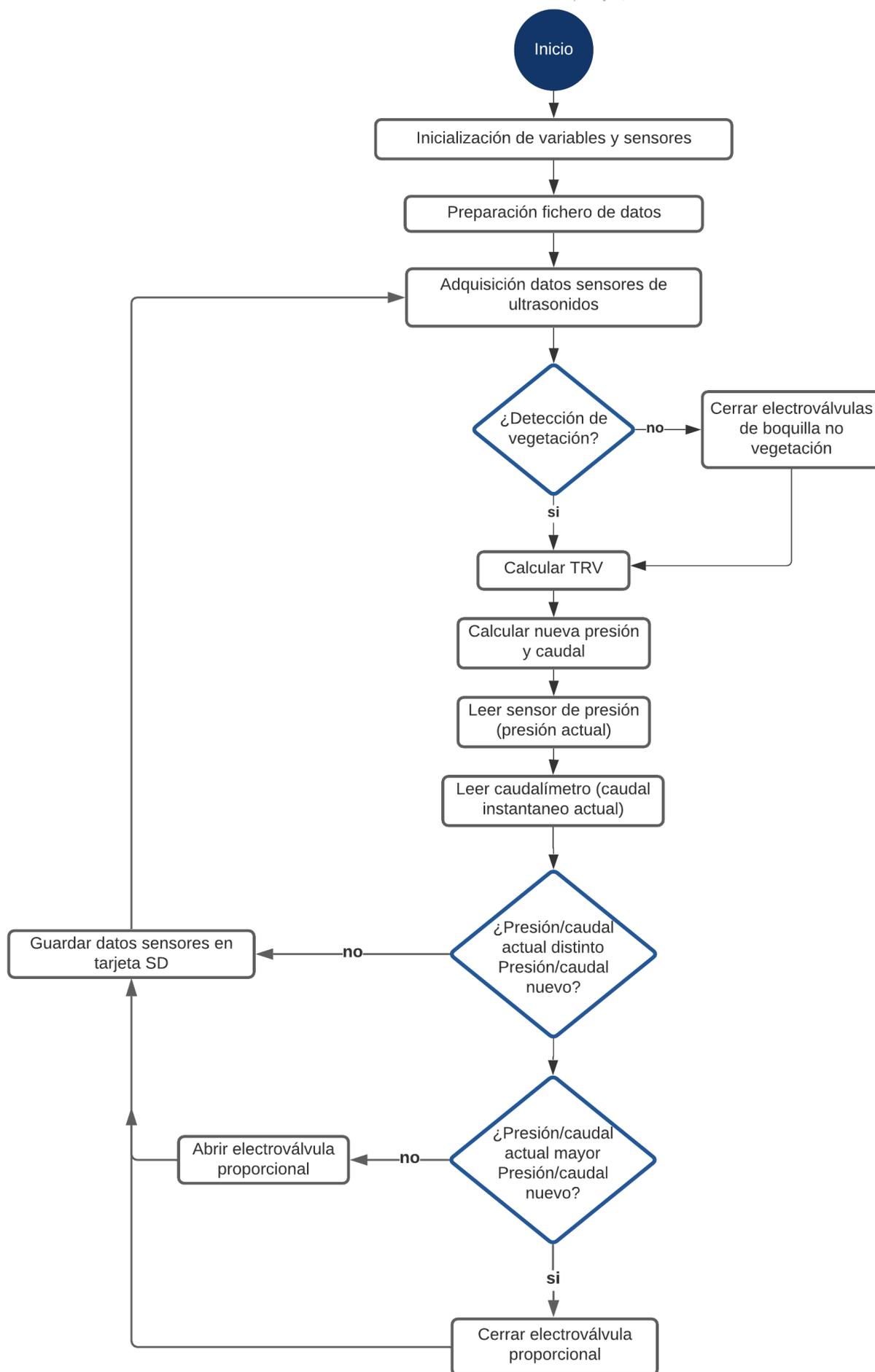


Figura 29. Diagrama de flujo de la aplicación. Fuente: Elaboración propia.

Estructura de la aplicación

La aplicación consta de ocho ficheros interconectados entre si. Hay un fichero principal (*PPrincipal.ino*) que contiene el cuerpo de la aplicación y según la fase del proceso en el que se encuentre, hace referencia a funciones que están ubicadas en el resto de los ficheros. Esta división en distintos ficheros por elementos hardware, se ha realizado para mantener una estructura más clara, fácil de comprender y ágil de mantener. La estructura de ficheros de la aplicación desarrollada se recoge en la Figura 30.

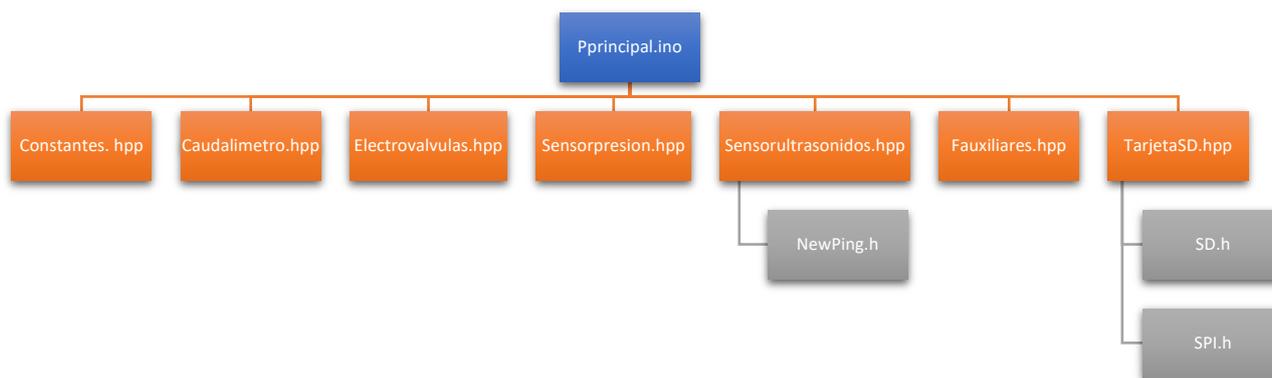


Figura 30. Estructura y relaciones de los ficheros de la aplicación. Fuente: Elaboración propia.

Donde:

- *PPrincipal.ino*: Contiene la inicialización de los sensores y todo el cuerpo de programa, función `setup()` y `loop()`.
- *Constantes.hpp*: En este fichero se definen todas las constantes que se utilizan en la aplicación, parametrizando los datos, para que si se necesita cambiar alguno de ellos no afecte a la lógica de la aplicación e implique la revisión de todo el código para actualizarlo a los nuevos cambios.
- *Caudalimetro.hpp*: Funciones de control del caudalímetro.
- *Electrovalvulas.hpp*: Funciones necesarias para el manejo de las electroválvulas.
- *Sensorpresion.hpp*: Funciones relativas a la lectura de datos procedentes del sensor de presión.
- *Sensorultrasonidos.hpp*: Funciones que leen los valores de los sensores de ultrasonidos y traducen la información en ancho de vegetación.
- *Fauxiliares.hpp*: Funciones comunes a todas las librerías.
- *TarjetaSD.hpp*: Funciones que permiten el acceso a la tarjeta de memoria para el almacenamiento de registro de datos del estado de los sensores (“*datalogger*”).

Librerías desarrolladas por terceros de acceso libre, que se han adaptado al sistema desarrollado:

- *Newping.h*: Librería que tiene funciones de acceso a la toma de datos de los sensores de ultrasonidos.
- *SD.h* y *SPI.h*: Ambas librerías incluyen funciones para el reconocimiento, inicialización y acceso a escritura/lectura de las tarjetas SD.

Código fuente de la aplicación

En este apartado se muestra el código fuente de todas la librerías usadas para la aplicación. Las librerías tienen al margen comentarios por cada línea donde se indican algún detalle aclaratorio de lo que se hace en esa parte del código.

1) Fichero principal

Pprincipal.ino

```

/* Programa principal de gestión de sensores y electroválvulas para pulverización */
#include "SensorUltrasonidos.hpp"
#include "Constantes.hpp"
#include "Caudalimetro.hpp"
#include "Electrovalvulas.hpp"
#include "SensorPresion.hpp"
#include "FAuxiliares.hpp"
#include "TarjetaSD.hpp"

//Variables

//Funciones

void setup() {
    setup_SensorUltrasonidos();
    setup_Caudalimetro();
    setup_Electrovalvulas();
    setup_SD();
}

void loop() {
    for (uint8_t i = 0; i < SONAR_NUM; i++) { // Recorre todos los sensores.
        if (millis() >= pingTimer[i]) { // Comprobamos si el sensor Sensoractivo es el que le corresponde el ping.
            pingTimer[i] += PING_INTERVAL * SONAR_NUM; // Definimos la próxima vez que el sensor Sensoractivo se le enviará un ping.
            sonar[Sensoractivo].timer_stop(); // Nos aseguramos que el ping que del sonar que está activo en este momento es cancelado antes de realizar un nuevo pin.
            Sensoractivo = i; //Seleccionamos el nuevo sensor
            cm[Sensoractivo] = 0; // Ponemos a cero la distancia tomando este valor en caso de que el ping no tenga respuesta.
            sonar[Sensoractivo].ping_timer(ChequeoEcho); // Hacemos el ping (Los procesos continúan ejecutándose, interrumpiéndose cuando recibamos echo del ping enviado).
        }
    } //fin del for

    for (uint8_t i = 0; i < SONAR_NUM; i++) { // Recorre todos los sensores.
        if ((cm[i] == 0) and (Valvula_ON_OFF[i] == 1)) {
            valvula_Off(i); //cerrar electroválvula correspondiente al sensor ultrasonidos activo y Valvula_ON_OFF[Sensoractivo]=0.
        }else {
            if ((cm[i] > 0) and (Valvula_ON_OFF[i] == 0)) {
                valvula_On(i); //abrir electroválvula correspondiente al sensor ultrasonidos activo y Valvula_ON_OFF[Sensoractivo]=1.
            }
        } //fin del else (cm>LINEACENTRALCM)
    } //fin del for

    float suma = 0.000;
    for (uint8_t j = 0; j < SONAR_NUM; j++) { // Recorre todos los sensores.
        suma = suma+cm[j];
    }
    prv = PRV(suma*0.010); //calcula el TRV (m3/ha)
    
```

```

lporhectarea = dosis(prv); // Cálculo de la dosis por hectárea (l/ha)
i_tasa = i_tasa_vol(prv,lporhectarea); //Cálculo de la tasa de volumen (l/m3)
t_caudal = tasa_caudal(i_tasa); //Cálculo de la tasa de caudal en (l/m3)
float dif_caudal = t_caudal-caudal_act; //Calcula la diferencia de caudal del actual al que se está
suministrando (l/min)
if (dif_caudal != 0) {Valvula3V(dif_caudal);} //Actúa sobre la electroválvula si es necesario para
regular el caudal.

if ((millis() > t_cierre) and (t_cierre > 0)) { //si se ha cumplido el tiempo de cierre que pare la maniobra la
válvula de 3 vías.
    Paro_V3V();
    t_cierre = 0;
}
if ((millis() > t_apertura) and (t_apertura > 0)) { //si se ha cumplido el tiempo de apertura que pare la
maniobra la válvula de 3 vías.
    Paro_V3V();
    t_apertura = 0;
}

if (millis()>contador){
    Fichero = SD.open(nombrefich, FILE_WRITE);
    if (Fichero) { //Guardar datos en tarjeta SD
        calculo_Volumen(); // escribe el volumen de caldo que ha pasado y el caudal instantáneo.
        presion=Presion_actual(); //escribir presion actual
        Fichero.println(escribir_datos());
        contador = millis()+FRECUENCIA_GRAB;
        Fichero.close();
    }
}
}
}
}

```

2) Fichero de constantes.

Constantes.hpp

```

/* Fichero de definición de constantes parametrizadas */
// Constantes modo de trabajo del sistema.

#define LINEACENTRALCM 90 // Máxima distancia en cm (es la distancia desde le centro del pasillo al
centro del cultivo).
#define NUM_ITERACIONES 5 // Número de iteraciones para el cálculo de la media TRV
#define PRESION_MAX 8 //Presion máxima que vamos a mantener en el circuito de pulverización
#define PRESION_MIN 1 //Presion mínima que vamos a mantener en el circuito de pulverización
#define CAUDAL_BOQUILLA 1.71 //Caudal de la boquilla a PRESION_MAX
#define Dv 1.15 //Deposición media microlitros/cm2.
#define EPSILON 0.80 //Tasa de recuperación según el equipo utilizado (60% para pistola pulverizadora,
80% para barras vertical de pulverización).
#define V_TRABAJO 1.300 // Velocidad teórica de trabajo en m/s.
#define ANCHO_VEHICULO 0 // Distancia que hay en perpendicular desde la línea que divide
longitudinalmente el vehículo hasta la barra de los sensores de ultrasonidos.

// Constantes correspondientes a los sensores de ultrasonidos.

#define SONAR_NUM 4 // Número de sensores
#define SONAR_SEPARACION 0.5 // Distancia en metros que separa un sonar de otro dentro de la
barra vertical donde se ubican
#define MAX_DISTANCE 500 // Máxima distancia en cm a ping.
#define PING_INTERVAL 35 //Milisegundos entre el ping de cada sensor (Un ping de un sensor tarda
aproximadamente 29 ms)
#define PIN_TRIGGER_SONAR1 4 // Pin conectado a Arduino para trigger sensor de ultrasonidos 1
#define PIN_ECHO_SONAR1 5 //Pin conectado a Arduino para echo del sensor de ultrasonidos 1
#define PIN_TRIGGER_SONAR2 4 // Pin conectado a Arduino para trigger sensor de ultrasonidos 2
#define PIN_ECHO_SONAR2 6 //Pin conectado a Arduino para echo del sensor de ultrasonidos 2

```

```

#define PIN_TRIGGER_SONAR3 4 // Pin conectado a Arduino para trigger sensor de ultrasonidos 3
#define PIN_ECHO_SONAR3 7 //Pin conectado a Arduino para echo del sensor de ultrasonidos 3
#define PIN_TRIGGER_SONAR4 4 // Pin conectado a Arduino para trigger sensor de ultrasonidos 4
#define PIN_ECHO_SONAR4 8 //Pin conectado a Arduino para echo del sensor de ultrasonidos 4

//Constantes correspondientes al caudalímetro

#define PIN_SCAUDAL 2 //pin conectado a Arduino para lectura de frecuencia del caudalímetro.
#define factorK 450.000 //factor que depende del modelo de caudalímetro, para el YF-s201 tenemos que
450 pulsos= 1 litro.

// Constantes correspondientes a las electroválvulas en boquillas.

#define VALVULAS_NUM 4 // Número de electroválvulas
#define PIN_VALVULA1 A2 // Pin conectado a Arduino para electroválvula 1
#define PIN_VALVULA2 A3 // Pin conectado a Arduino para electroválvula 2
#define PIN_VALVULA3 A4 // Pin conectado a Arduino para electroválvula 3
#define PIN_VALVULA4 A5 // Pin conectado a Arduino para electroválvula 4

#define PIN_VALVULA3V_ON 3 //Pin conectado a Arduino para electroválvula de 3 vías maniobra de
apertura.
#define PIN_VALVULA3V_OFF A1 //Pin conectado a Arduino para electroválvula de 3 vías maniobra de
cierre.
#define TIEMPO_VALVULA3V 7000.000 //Tiempo en ms que tarda la electroválvula de 3 vías en realizar
la maniobra de apertura o cierre.
#define CAUDAL_MAX_V3V 60.000 //Caudal máximo que da la válvula de 3 vías en l/min.

// Constantes correspondientes al sensor de presión.

#define PIN_SPRESION A0 // Pin conectado a Arduino para sensor de presión.

// Constantes correspondientes a la tarjeta SD.
#define chipSelect 9 //Pin de la tarjeta SD
#define FRECUENCIA_GRAB 300 // Frecuencia con la que se graba un dato en el datalogger.

```

3) Fichero de funciones del caudalímetro.

Caudalimetro.hpp

```

// Librería con funciones auxiliares del caudalímetro.

#include "constantes.hpp"

//variables caudalímetro
volatile float contadorpulsos=0; //variable que almacena el número de pulsos del sensor del caudal.
float volumen=0; //variables que almacena el volumen de líquido consumido.
unsigned long Tmp_lectura; //Tiempo en el que se toma la ultima lectura.
volatile float ult_lectura=0; //variable que almacena el número de pulsos ultima lectura.
float caudal_act = 0; //Último caudal medido.

//Funciones
void ISRContadorPulsos()
{
    contadorpulsos++; //Pulsos contados
    if ((millis()-Tmp_lectura)>1000){
        caudal_act = (((contadorpulsos-ult_lectura)/factorK)*60000)/(millis()-Tmp_lectura); //Caudal
instantáneo medido en l/min
        Tmp_lectura = millis();
        ult_lectura = contadorpulsos;
    }
}

void setup_Caudalimetro() { //Setup caudalímetro

```

```

attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_SCAUDAL),ISRContadorPulsos,RISING); //Cuenta los pulsos
que da el caudalímetro.
    Tmp_lectura = millis(); //asignamos tiempo a la lectura 0.
}

void calculo_Volumen(){
    volumen=contadorpulsos/factorK; //Calculamos el volumen en función de los pulsos que se han producido
(litros).
}

void Mostrar_datos_caudalímetro() { // Muestra el resultado por la pantalla.
    calculo_Volumen();
    Serial.print("Volumen =");
    Serial.print(volumen,3);
    Serial.print(" litros (");
    Serial.print(contadorpulsos);
    Serial.print(") ");
    Serial.print("Caudal =");
    Serial.print(caudal_act,3);
    Serial.print(" l/min");
    Serial.println();
}
    
```

4) Fichero de funciones de las electroválvulas.

Electrovalvulas.hpp

```

// Librería con funciones auxiliares de las electroválvulas.

#include "constantes.hpp"

// variables electroválvulas
unsigned int Valvula_ON_OFF[VALVULAS_NUM]; // Estado ABIERTO/CERRADO de las
electroválvulas en boquillas.
unsigned long t_cierre=0; //indica hasta cuando se realiza la maniobra de cierre de la electroválvula 3 vías
(0 indicara ausencia de tiempo para la maniobra).
unsigned long t_apertura=0; //indica hasta cuando se realiza la maniobra de apertura de la electroválvula
de 3 vías (0 indicara ausencia de tiempo para la maniobra).

//funciones

void setup_Electrovalvulas() {
    //Setup electroválvulas asociadas a boquillas.
    for (uint8_t i = 0; i < VALVULAS_NUM; i++)
        Valvula_ON_OFF[i] = 1;
    pinMode(PIN_VALVULA1,OUTPUT);
    pinMode(PIN_VALVULA2,OUTPUT);
    pinMode(PIN_VALVULA3,OUTPUT);
    pinMode(PIN_VALVULA4,OUTPUT);
    //Setup electroválvula proporcional reguladora de presión.
    pinMode(PIN_VALVULA3V_ON,OUTPUT);
    pinMode(PIN_VALVULA3V_OFF,OUTPUT);
}

void valvula_On (int codigo) { //Abrir electroválvula de boquilla número=código
    Valvula_ON_OFF[codigo] = 1; //asignamos estado a electroválvula de boquilla número=código
    switch (codigo) {
        case 0:
            digitalWrite(PIN_VALVULA1,HIGH);
            break;
        case 1:
            digitalWrite(PIN_VALVULA2,HIGH);
            break;
        case 2:
    
```

```

    digitalWrite(PIN_VALVULA3,HIGH);
    break;
    case 3:
        digitalWrite(PIN_VALVULA4,HIGH);
        break;
    }
}

void valvula_Off (int codigo) { //cerrar electroválvula de boquilla número=codigo
    Valvula_ON_OFF[codigo] = 0; //asignamos estado a electroválvula de boquilla número=código
    switch (codigo) {
    case 0:
        digitalWrite(PIN_VALVULA1,LOW);
        break;
    case 1:
        digitalWrite(PIN_VALVULA2,LOW);
        break;
    case 2:
        digitalWrite(PIN_VALVULA3,LOW);
        break;
    case 3:
        digitalWrite(PIN_VALVULA4,LOW);
        break;
    }
}

int N_ValvulasON(){
    int nvalvulas=0;
    for (uint8_t i = 0; i < VALVULAS_NUM; i++) { // Recorre todos los estados de las válvulas.
        nvalvulas += Valvula_ON_OFF[i];
    }
    return nvalvulas;
}

void Apertura_V3V(){ //realiza la maniobra de apertura de la electroválvula de 3 vías.
    digitalWrite(PIN_VALVULA3V_OFF,LOW);
    digitalWrite(PIN_VALVULA3V_ON,HIGH); //abrimos electroválvula
}

void Cierre_V3V(){ //realiza la maniobra de cierre de la electroválvula de 3 vías.
    digitalWrite(PIN_VALVULA3V_ON,LOW);
    digitalWrite(PIN_VALVULA3V_OFF,HIGH); //cerramos electroválvula
}

void Paro_V3V(){ //Detiene la maniobra de apertura/cierre que estuviese haciendo la electroválvula de 3
vías.
    digitalWrite(PIN_VALVULA3V_OFF,LOW);
    digitalWrite(PIN_VALVULA3V_ON,LOW);
}

void Valvula3V(float res_caudal){ //ajusta la electroválvula al nuevo caudal
    if (res_caudal<0) {
        t_apertura = 0; //Desactivamos cualquier orden de apertura que tuviera dada.
        t_cierre = round((((abs(res_caudal))*TIEMPO_VALVULA3V)/CAUDAL_MAX_V3V)); //cálculo de hasta
cuando está cerrando la electroválvula de 3 vías.
        if (t_cierre > TIEMPO_VALVULA3V) {t_cierre = 7000;}
        t_cierre = millis() + t_cierre;
        Cierre_V3V(); //Orden de cierre de la electroválvula de 3 vías.
    } else {
        if (res_caudal>0) {
            t_cierre = 0; //Desactivamos cualquier orden de cierre que tuviera dada.
            t_apertura=round(((res_caudal*TIEMPO_VALVULA3V)/CAUDAL_MAX_V3V)); //cálculo de hasta
cuando está abriendo la electroválvula de 3 vías.
        }
    }
}

```

```

    if (t_apertura > TIEMPO_VALVULA3V) {t_apertura = 7000;}
    t_apertura = millis() + t_apertura;
    Apertura_V3V(); //Orden de apertura de la electroválvula de 3 vías.
}
}
}

```

5) Fichero de funciones del sensor de presión.

Sensorpresion.hpp

```

// Librería con funciones auxiliares del Sensor de presión.

#include "constantes.hpp"

//variables
int lectura_presion; //Variable que almacena la lectura del pin correspondiente del arduino.
float presion; //Variable que almacena la presión en bares del circuito de pulverización.

//Funciones
float Presion_actual(){
    lectura_presion=analogRead(PIN_SPRESION); //Leemos la presión que nos indica el sensor en el pin
    correspondiente.
    return (lectura_presion-102.3)/81.34; //Cálculo de presión en bar. Rango 0-5V (Entero entre 0-1023). Así
    0,5V (102.3) corresponde a presión de 0 bar y 4.5V (920.7) equivaldría a 10 bar.
}

void Mostrar_datos_presion() { // Muestra el resultado por la pantalla.
    //calculo_Presion();
    presion=Presion_actual();
    Serial.print("Presion =");
    Serial.print(presion,3);
    Serial.print(" bar (");
    Serial.print(lectura_presion);
    Serial.print(")");
    Serial.println();
}

```

6) Fichero de funciones de los sensores de ultrasonidos.

Sensorultrasonidos.hpp

```

// Librería con funciones auxiliares del sensor de ultrasonidos.
#include "constantes.hpp"
#include <NewPing.h>

// variables
unsigned long pingTimer[SONAR_NUM]; // Vector de tiempos que almacena los tiempos en los que debe
de realizarse el siguiente ping de cada sensor de ultrasonidos.
int cm[SONAR_NUM]; // Vector donde se almacena el ancho de vegetación en función de las
distancias medidas por cada uno de los sensores de ultrasonidos en cada iteración.
//unsigned int cm_acumulado[SONAR_NUM]; // Vector donde se almacena las distancias medidas por
cada uno de los sensores de ultrasonidos durante NUM_ITERACIONES iteraciones.
uint8_t Sensoractivo = 0; // Variable que nos indica el sensor de ultrasonidos activo en cada
momento.
//uint8_t iteracion = 0; // Variable que nos indica el número de la iteración para el cálculo del TRV.
NewPing sonar[SONAR_NUM] = { // Vector donde se declaran los sensores de ultrasonidos del sistema
y los pines del arduino que le corresponden a cada uno.
    NewPing(PIN_TRIGGER_SONAR1, PIN_ECHO_SONAR1, MAX_DISTANCE), // Parámetro de cada uno
de los sensores definidos desde el más cercano al suelo hasta el más alto
    NewPing(PIN_TRIGGER_SONAR2, PIN_ECHO_SONAR2, MAX_DISTANCE),
    NewPing(PIN_TRIGGER_SONAR3, PIN_ECHO_SONAR3, MAX_DISTANCE),
    NewPing(PIN_TRIGGER_SONAR4, PIN_ECHO_SONAR4, MAX_DISTANCE)
}

```

```
};

//Funciones

void setup_SensorUltrasonidos() { // Setup Sensores de ultrasonidos.
    pingTimer[0] = millis() + 500; // Primer ping empieza a 500ms (tiempo que el arduino comienza a
    funcionar (75ms)).
    for (uint8_t i = 1; i < SONAR_NUM; i++) { // Asigna el tiempo de comienzo de cada sensor.
        pingTimer[i] = pingTimer[i - 1] + PING_INTERVAL;
    }
}

void ChequeoEcho() { // Si el pin es recibido que mande al array la distancia.
    if (sonar[Sensoractivo].check_timer()) {
        cm[Sensoractivo] = sonar[Sensoractivo].ping_result * 0.01716;
        if (cm[Sensoractivo] >= (LINEACENTRALCM-ANCHO_VEHICULO)) {
            cm[Sensoractivo] = 0; //No hay cultivo
        } else {
            cm[Sensoractivo] = LINEACENTRALCM-ANCHO_VEHICULO-cm[Sensoractivo]; //Calcula los cm
            de profundidad del cultivo.
        }
    }
}

void Mostrar_datos_sonar() { // Muestra el resultado por la pantalla.
    for (uint8_t i = 0; i < SONAR_NUM; i++) {
        Serial.print("Sonar nº");
        Serial.print(i);
        Serial.print(" = ");
        Serial.print(cm[i]);
        Serial.print(" cm --- ");
        Serial.print(pingTimer[i]);
        Serial.print(" ms --- ");
    }
    Serial.println();
}
}
```

7) Fichero de funciones auxiliares.

Fauxiliares.hpp

```
// Funciones auxiliares que se utilizan para el cálculo de algunos procesos.

#include "Constantes.hpp"

//Variables
float prv = 0; //Variable para almacenar el cálculo del TRV cada x iteraciones.
float i_tasa = 0; //Variable para almacenar el cálculo de la tasa de volumen cada x iteraciones.
float t_caudal = 0; //Variable que almacena la tasa de caudal cada x iteraciones.
float lporhectarea = 0; //Variable que almacena la tasa de caudal cada x iteraciones.

//Funciones

float PRV(float suma) {
    if (suma > 0) {
        return (SONAR_SEPARACION*suma*10000)/(LINEACENTRALCM*0.01); //cálculo del TRV en m3/ha.
    } else {
        return 0;
    }
}
}
```

```
float dosis(float prv){ //función que calcula los litros por hectárea que tenemos que aplicar en función del PRV
    return (0.007*Dv*(pow(prv,1.25)))/EPSILON;
}

float i_tasa_vol(float prv,float l_ha) {
    if (prv > 0) {
        return l_ha/prv; //Calculamos la tasa de volumen en l/m3 conocido el volumen por hectárea.
    } else {
        return 0;
    }
}

float tasa_caudal(float i) {
    return i*V_TRABAJO*60; //Calculamos el caudal que tenemos que aplicar en l/min.
}

String escribir_datos(){ //función que me va a permitir escribir los datos en un fichero en tarjeta SD
    String cadena;
    for (uint8_t i = 0; i < SONAR_NUM; i++) { //escribir medidas realizadas por los sensores de ultrasonidos.
        cadena = cadena + cm[i]+ ",";
    }
    for (uint8_t i = 0; i < VALVULAS_NUM; i++) { //escribir medidas realizadas por los sensores de ultrasonidos.
        cadena = cadena + Valvula_ON_OFF[i]+ ",";
    }
    cadena = cadena + prv + ","+ lporhectarea + ","+ i_tasa + ","+ t_caudal + ","+ caudal_act + ","+ volumen + ","+ presion + ","+ contadorpulsos+","+t_cierre+","+t_apertura;
    Serial.println(cadena);
    return cadena;
}
```

8) Fichero de funciones para el manejo de la tarjeta SD.

TarjetaSD.hpp

```
//Librería con funciones para el control de tarjeta SD.
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include "Constantes.hpp"

//Variables
File Fichero;
unsigned long contador = FRECUENCIA_GRAB; //variable que almacena cada cuando se guarda un dato en el fichero (ms).
String nombrefich; //variable que contiene el nombre del fichero

void setup_SD() {
    Serial.begin(115200); //Serial.begin(115200);
    while (!Serial) {
        ; // Espera al puerto serie para conectar.
    }
    Serial.print("Inicializando tarjeta SD...");
    // Mira si la tarjeta esta insertada y puede ser inicializada.
    if (!SD.begin(chipSelect)) {
        Serial.println("Fallo tarjeta o esta no está presente");
        while (1);
    }
    Serial.println("tarjeta inicializada.");
    nombrefich="datlog1.txt";
    int num_nombrefich=1; //Variable que va contando los ficheros que se van grabando.
```

```
while (SD.exists(nombrefich)) {  
    num_nombrefich++;  
    nombrefich = String("datlog" + String(num_nombrefich) + ".txt");  
}  
}
```

4.2. METODOS.

En este apartado se describe la metodología que se ha llevado a cabo para la realización de las pruebas en el laboratorio, puesto que las que estaban prevista hacer en campo, por las restricciones provocadas por la COVID-19, no ha sido posible llevarlas a cabo.

1. Simulación de la vegetación en laboratorio.

Para simular la vegetación se han montado tres estructuras, compuestas cada una de ellas por dos postes de acero con una base de hormigón y una malla verde de 2 metros de altura y 5 metros de longitud. A un poste se ha fijado un lateral de la malla en posición vertical y el otro lateral ha sido fijado a otro poste, cuando ambos postes se separan forman una red de 2 metros de altura por 5 metros de longitud. La fijación de la malla al poste se ha realizado mediante bridas. Una vez colocada la malla se observa, como por la longitud y altura que esta tiene y el tipo de estructura que la sustenta, se forman ondulaciones dándole un efecto más realista a como es la vegetación dentro de un invernadero.

Uniendo las tres estructuras entre sí, una a continuación de la otra, y cubriendo los huecos entre estructura y estructura se ha formado una línea de cultivo simulada de 15,70 metros (Ver Figura 31).

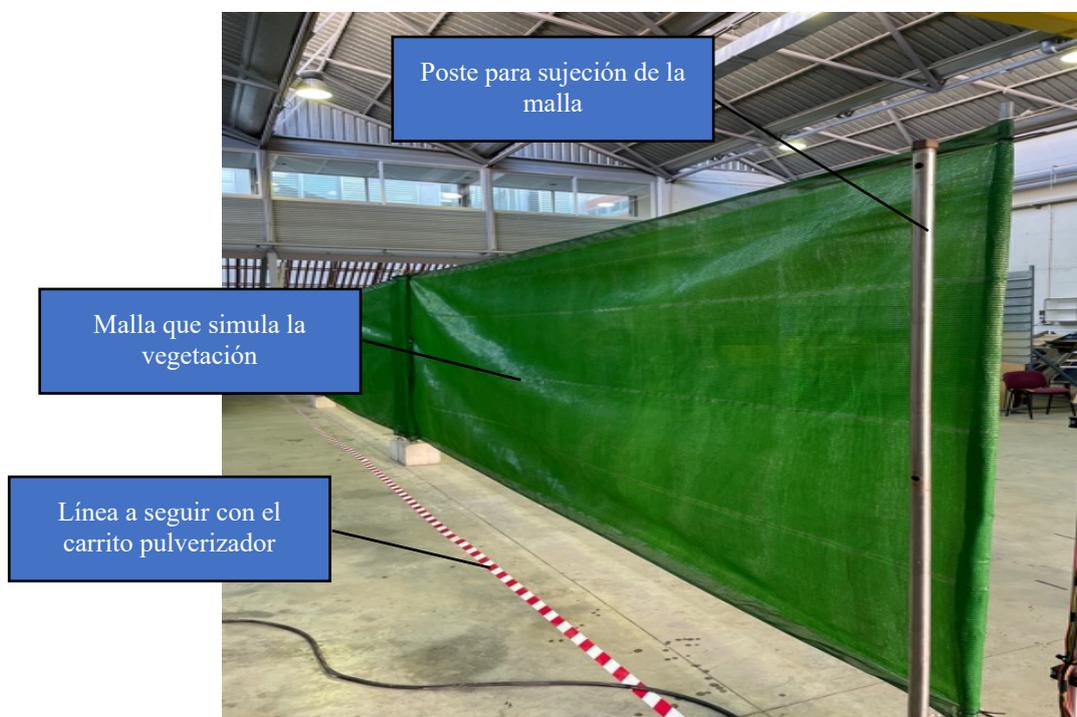


Figura 31. Malla de simulación de la vegetación. Fuente: Elaboración propia.

2. Equipo de aplicación de fitosanitarios y condiciones de entorno

El sistema de control de la pulverización se implementa en un carro de pulverización abatible con estructura de acero galvanizado y ruedas neumáticas y con tracción manual fabricado por Carretillas Amate S.L. (Almería) (Figura 33), dotado de:

- Una barra vertical, con 4 portaboquillas eléctricas de la marca Arag modelo 4064T942, a las que se le acoplan 1 boquilla de pulverización por cada portaboquilla de la marca Teejet modelo XR11002-VK.
- Un mástil situado a una distancia (D_v) de 106 cm, donde se han ubicado los cuatro sensores de ultrasonidos encargados de medir el ancho de vegetación simulada.
- Una batería de 12 Vdc que es la encargada de suministrar la alimentación tanto a la electrónica como a las electroválvulas del sistema.
- Una caja estanca donde está ubicado en su interior el módulo de control con todos los componentes electrónicos necesarios para la recepción de datos y toma de decisiones sobre los actuadores (Ver Figura 32).

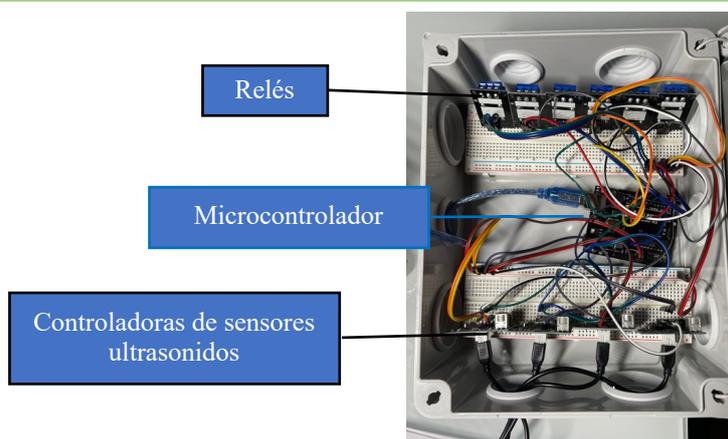


Figura 32. Módulo de control. Fuente: Elaboración propia.

Este carro de pulverización se desplaza al lado de la línea de cultivo simulada en el laboratorio, realizando una la aplicación solo al lado donde esta ubicada la línea. La pulverización se inicia al principio de la línea, y se cierra al final o cuando no exista vegetación simulada. La distancia (D_h) entre el inicio de la pulverización y la malla utilizada para la simulación del cultivo es de unos 0,3-0,4 m., lo que corresponde con una anchura de vegetación de 0,5-0,6 m., puesto que se considera que la distancia entre líneas de vegetación mide 1,8 m. Sobre el suelo y para facilitar el desplazamiento con el carro de pulverización manteniendo esta distancia se ha colocado una cinta con franjas blancas y rojas, separada de la malla 30-40 cm (D_h). Se ha utilizado esta separación ya que la distancia media entre el dosel y las boquillas en los tratamientos que se realizan en invernaderos, y según estudios realizados al respecto, es de aproximadamente 35 cm (Sánchez-Hermosilla et al. 2011, 2012).

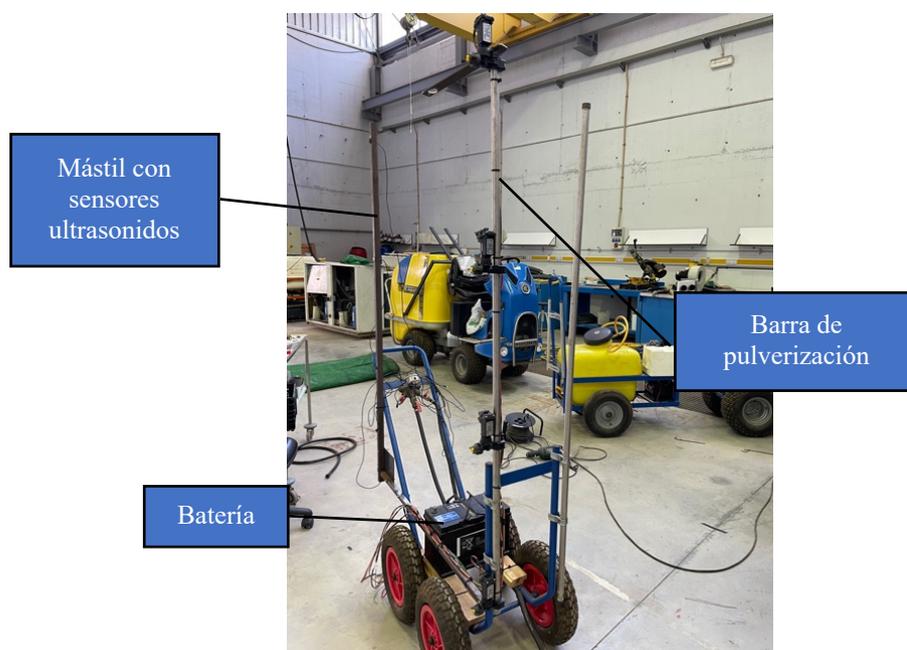


Figura 33. Carretilla de pulverización. Fuente: Elaboración propia.

3. Ensayos en el laboratorio

Previo a la realización de los ensayos y para comprobar que estos se realizan a una velocidad de 1,3 m/s aproximadamente, se realizan tres pases por toda la línea de cultivo con la carretilla pulverizadora pero sin que el sistema este actuando, esos pases se han cronometrado (App cronometro, Smartphone Iphone 12, Apple, One Apple Park Way, Cupertino, EEUU) y se ha calculado la velocidad media después de realizarlos teniendo una referencia a la hora de realizar los ensayos y no alejarse mucho del objetivo marcado de velocidad de trabajo.

La presión en el circuito hidráulico que se seleccionó estaba entre 5-6 bares, en este sentido, decir que este rango ha estado condicionado por la máxima presión que permitía la apertura y cierre de las electroválvulas portaboquillas de forma correcta, que aunque en las especificaciones del fabricante aparece que pueden trabajar como máximo a 8 bares, en realidad se pudo comprobar que a partir de 6 bares tenían dificultades para cerrar.

Una vez obtenida esa referencia, para comprobar si el sistema diseñado cumple con las especificaciones impuestas, se han desarrollado tres ensayos, descritos a continuación:

- Ensayo nº 1

Con el sistema en marcha se realizan tres repeticiones guiando la carretilla pulverizadora por la línea marcada en el suelo y a la velocidad que se ha estimado de referencia. En este primer ensayo la malla esta colocada de forma continua, sin ningún hueco, y a la misma distancia de la línea marcada.

El objetivo de este ensayo es simular que el sistema de regulación de caudal no actúa, para posteriormente compararlo con los siguientes ensayos donde este sistema debe de funcionar.

- Ensayo nº 2

Al igual que en el ensayo anterior, en este también se realizan tres repeticiones con el sistema de pulverización en funcionamiento, pero la diferencia está en que una de las 3 mallas, en concreto la central, se ha retranqueado 17 cm, con esto se consigue una simulación de la vegetación donde en la parte central de la línea se tiene menos anchura.

Cuando no esta retranqueada la anchura de vegetación estaba comprendida entre 50-60 cm, en este ensayo en la parte central el ancho es de 33-43 cm. Con esta configuración se pretende que sistema reaccione al llegar a esta parte y mediante una regulación de la presión a través de la actuación sobre la electroválvula proporcional pulverizar menos dosis.

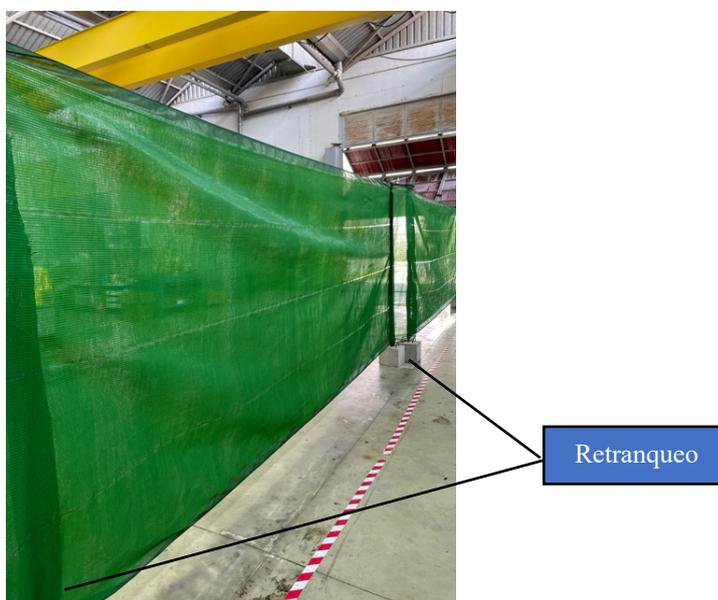


Figura 34. Malla retranqueada. Fuente: Elaboración propia.

- Ensayo nº 3

El ultimo ensayo, que se ha realizado, va encaminado a ver si el sistema es capaz de detectar donde existe vegetación, activando la electroválvula correspondiente de la barra de pulverización para cerrarla en caso de no detectarla, y a la vez que esta se cierra, el sistema actúa sobre al electroválvula proporcional para

regular la presión, garantizando el caudal correcto en función del PRV en el resto de electroválvulas abiertas.

Para la simulación de estos huecos se han realizado en la malla agujeros de aproximadamente 1 metro de longitud a distintas alturas (simulando plantas con distinto estado de desarrollo), también se han separado dos mallas (45 cm) creando así un hueco que simula la ausencia total de vegetación. Otros huecos se han hecho de forma irregular para simular un aumento progresivo del tamaño de la vegetación en la línea. El retranqueo introducido en el ensayo nº 2, se elimina y se coloca toda la línea de malla a la misma distancia de la línea marcada en el suelo.

Este ensayo, al igual que los anteriores, también se repite tres veces.



Figura 35. Malla con huecos. Fuente: Elaboración propia.

Los ensayos ya no se cronometran puesto que con el registro de datos que el sistema va realizando al final del recorrido se conoce el tiempo que se tarda en cada uno de ellos.

Una vez concluidos los ensayos se extrajo la tarjeta SD del sistema encargada de registrar los estados del sistema de forma periódica (cada 300 ms). Este registro tiene dos funciones:

- 1) Permite controlar que los ensayos se realizan correctamente.
- 2) Permite poder comprobar mediante técnicas de explotación de datos estadísticos si el sistema cumple con los objetivos marcados.

Los datos que se obtienen están separados por filas (una por cada periodo de grabación) y los distintos estados dentro de la misma fila aparecen separados por punto y coma. En cada periodo se graba la siguiente información:

- Medidas de anchura de la vegetación de cada uno de los sensores de ultrasonidos.
- Estado de las electroválvulas de la barra de pulverización.
- Cálculo del PRV en función de las medidas realizadas.
- Cálculo del Volumen teórico a aplicar en cada estado (l/ha).
- Cálculo de la dosis a aplicar por la barra de pulverización (l/min).
- Caudal instantáneo del sistema de pulverización (l/min).
- Presión instantánea del sistema de pulverización (bar)
- Volumen total consumido (litros).
- Nº Pulsos contados por el caudalímetro.
- Estado de la electroválvula proporcional.

Esta información se organiza en ficheros, creándose un por cada ensayo y repetición, por tanto en este caso el número de ficheros obtenidos son nueve.

Con los datos extraídos de cada uno de los ensayos realizados y mediante el software SSPS, se comparan mediante un análisis de la varianza, para determinar la existencia de diferencias significativas en el ahorro de líquido pulverizado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

El resultado final obtenido, ha sido un sistema de control de bajo coste para la aplicación selectiva de fitosanitarios dentro de un invernadero que se puede acoplar a un vehículo autopropulsado. Este resultado ha sido fruto de la integración entre sí, tal y como hemos visto en el apartado anterior, de una serie de elementos hardware a través de un microcontrolador (véase apartado 4.1.1), que ha sido programado con un software específico desarrollado para que realice las acciones propuestas (véase apartado 4.1.2.2).

Con este sistema resultante y siguiendo la metodología expuesta en el punto 4.3, se han obtenido una serie de datos de los ensayos realizados que son analizados en los siguientes apartados.

5.1. ANALISIS DE DATOS.

El análisis de datos tiene como finalidad la comprobación de si el sistema diseñado es capaz de ahorrar volumen de aplicación sin que por el contrario afecte al resultado, obteniéndose la misma eficacia que con la realización de un tratamiento donde el consumo de caldo es superior, manteniendo una deposición adecuada en las hojas.

Para ello, se utiliza el software SPSS, pero para poder introducir los datos en el aplicativo, se tiene que organizar la información obtenida quedándose sólo aquella que resulta interesante para su estudio.

Lo primero que se realiza es la eliminación de todas las filas de los ficheros que están al comienzo y al final, donde los sensores no registraban vegetación. Esas filas corresponden por un lado a los estados grabados desde que se pone en marcha el sistema hasta que se comienza el ensayo, y por el otro, a los estados que se graban desde que se termina el ensayo hasta que se le da la orden de paro al sistema.

A continuación, se traslada la información a un fichero Excel y se seleccionan sólo las columnas que serán objeto de estudio, puesto que algunas de ellas son columnas de control durante la ejecución de los ensayos. En este caso, las columnas que se seleccionan son: PRV (m^3/ha), Volumen (l/ha), Caudal (l/min) y Presión (bares).

Con los datos seleccionados y para poder determinar si el sistema diseñado realmente cumple con los objetivos iniciales marcados, se estudian dos variables:

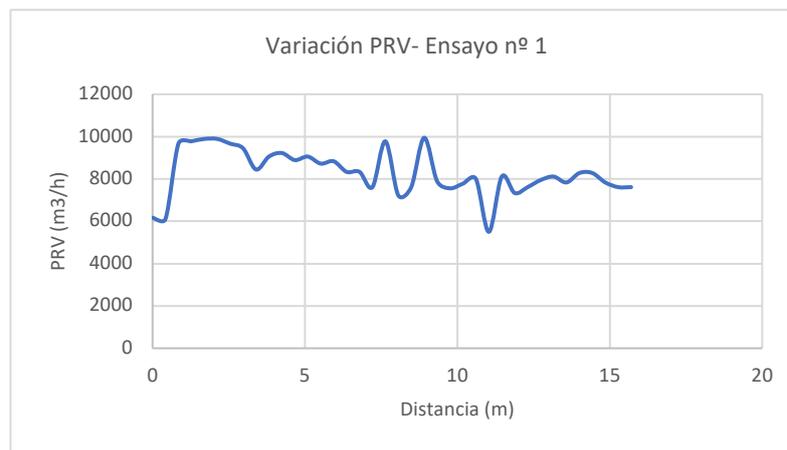
- 1) Si el sistema es capaz de captar bien la información proveniente de la línea de vegetación, es decir, si con la información que los sensores de ultrasonidos facilitan generan una medida de la anchura de vegetación fiable.

Para ello, con los datos obtenidos, se grafica el PRV a lo largo de la línea de vegetación simulada, para ver si los sensores han reflejado las modificaciones que se han realizado a esta en cada uno de los ensayos.

De manera que:

- Ensayo nº 1: Línea de vegetación simulada uniforme.

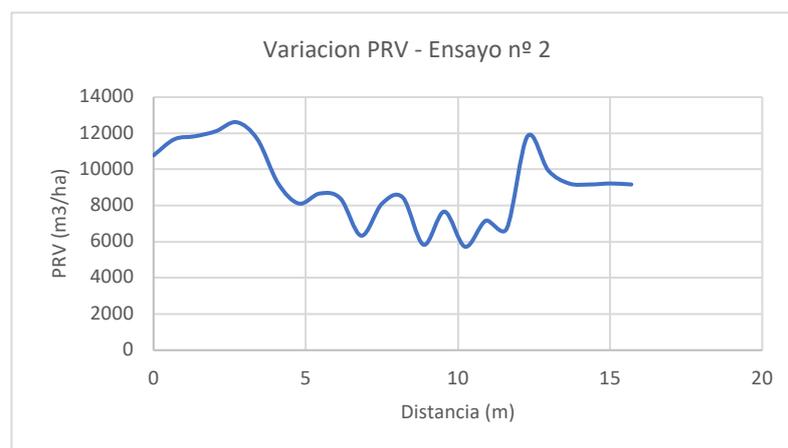
En la Gráfica 1, se aprecia como conforme se avanza en la línea de vegetación simulada, el PRV sigue más o menos una línea constante, los saltos que se ven son debidos a que la malla no se puso totalmente estirada y tenía ondulaciones, eso hace que los sensores captan en esas zonas una diferencia de espesor.



Gráfica 1. Variación del PRV a lo largo de la línea de vegetación simulada en el ensayo nº1. Fuente: Elaboración propia.

- Ensayo nº 2: Línea de vegetación simulada con tramo central retranqueado**

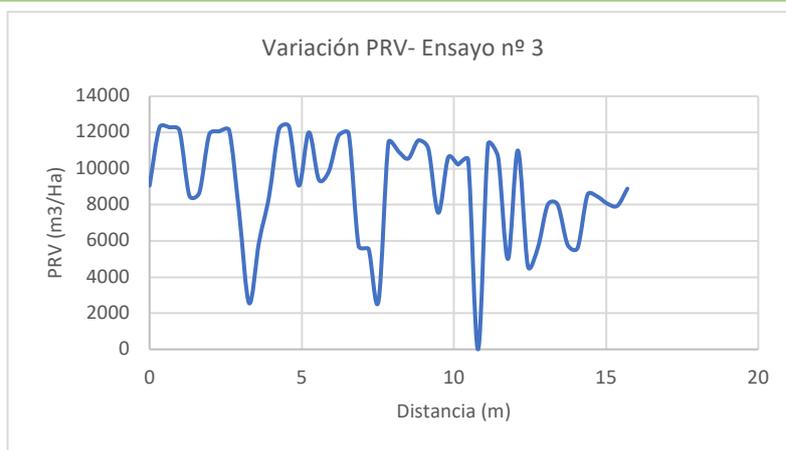
En la Gráfica 2, se puede apreciar como a medida que se avanza en la línea de vegetación simulada, el PRV se mantiene en un primer tramo constante, para luego descender, coincidiendo ese descenso con el retranqueo realizado a la malla, y volviendo a subir en el tramo final, donde el retranqueo ya no existía (véase Figura 34). Al igual que antes los saltos que se aprecian son debidos a que la malla no se puso totalmente estirada y tenía ondulaciones, eso hace que los sensores capten en esas zonas una diferencia de espesor.



Gráfica 2. Variación del PRV a lo largo de la línea de vegetación simulada en el ensayo nº2. Fuente: Elaboración propia

- Ensayo nº 3: Línea de vegetación simulada con huecos**

En este ensayo, la Gráfica 3 muestra unas oscilaciones grandes y otras más pequeñas, las pequeñas son debidas a que la malla no se puso totalmente estirada y tenía ondulaciones, eso hace que los sensores capten en esas zonas una diferencia de espesor. Mientras que las oscilaciones más grandes se dan donde la malla tiene un hueco, ya que el PRV baja de forma muy acusada (véanse en el gráfico los puntos situados a 4 y 7,5 m.), incluso el hueco donde había ausencia completa de vegetación ha sido reflejado con un cero (distancia de 10,5 metros). En la parte final de la grafica se observa como el PRV va en ascenso reflejando el hueco que tiene la malla para simular un aumento progresivo de la altura de la vegetación. (véase Figura 35).



Gráfica 3. Variación del PRV a lo largo de la línea de vegetación simulada en el ensayo nº3. Fuente: Elaboración propia

Con estas graficas, y observando como estan dispuestas las mallas en cada uno de los ensayos se puede constatar que, efectivamente los sensores responden de forma correcta, captando las distancias a la vegetación simulada y realizando de forma fiable el cálculo de su espesor.

- 2) Ahora, una vez obtenidas esas medidas, se pretende comprobar que el sistema las procesa y envía las ordenes a los actuadores de forma correcta. Para ello, se utiliza el software estadístico SPSS para analizar los datos de suministro de volumen (l/ha) que habíamos obtenido en los ensayos y compararlos entre sí, permitiendo ver si realmente con diferentes espesores de vegetación (ensayo nº 2) y con huecos (ensayo nº 3) el volumen suministrado es inferior al obtenido en el ensayo nº 1 (vegetación uniforme). Los resultados obtenidos mediante el software después de aplicar el test de Duncan con un coeficiente $\alpha = 0,05$, se han reflejado en la Tabla 4:

Tabla 4. Tabla de ensayos test de Duncan. Fuente: Elaborada a partir del Software SPSS.

Nº de Ensayo	Descripción	Volumen (l/ha)
1	Línea de vegetación simulada uniforme.	650,1263 ^(b)
2	Línea de vegetación simulada con tramo central retranqueado.	683,6956 ^(b)
3	Línea de vegetación simulada con huecos.	504,4331 ^(a)

^{(a)(b)}Letras diferentes implican diferencias significativas.

Test de Duncan $\alpha=0,05$

Viendo los resultados que arroja el test de Duncan, se puede afirmar que efectivamente el sistema de dosificación selectiva a funcionado, ya que se pueden encontrar diferencias significativas entre las aplicaciones realizadas a las líneas de vegetación simulada con huecos y la simulada uniforme, y como es lógico el volumen (l/ha) aplicado a las líneas con huecos es menor, puesto que en las partes donde no hay malla (ausencia de vegetación) no ha pulverizado el sistema reduciéndose así el gasto en un 22,4% con respecto a una aplicación sin control de la pulverización. Este ahorro es menor que el que se encuentra en otros estudios, que lograron ahorros de entre el 38 y el 51%. Sin embargo, estos estudios utilizaron sistemas más costosos basados en la captación de información a través de sensores LIDAR (Chen et al. 2011; Liu et al. 2012; Méndez et al. 2013).

Ahora bien, se deberían de haber encontrado también diferencias significativas entre la línea de vegetación simulada uniforme y la simulada con tramo central retranqueado, ya que esta última, como se viene diciendo, en el tramo retranqueado se necesita un volumen de caldo inferior al de los otros tramos por representar el retranqueo una menor anchura de vegetación, y esto no se ha producido debido a que las electroválvulas portaboquillas tienen dificultades para cerrar con presiones superiores a 6 bares (aunque en la ficha técnica indica que la presión máxima de trabajo es de 8 bares), eso hizo que se tuviera que trabajar con una presión en torno

a 5-6 bares, que hacía que el caudal que salía por las boquillas fuese inferior al que se debería suministrar teniendo en cuenta el PRV calculado. De ahí que esa limitación no permitiera una regulación de la dosis en el ensayo nº 2.

5.2. ANALISIS DE COSTES.

En este apartado se detalla el material empleado con su valoración correspondiente, y se discute si el total de la valoración cumple con uno de los principales objetivos que se han planteado en el proyecto, y es que este debe de ser de bajo coste. Para ello, se comparará con algún sistema que actualmente se encuentre comercializándose y que tenga unas características similares. En Tabla 5 se recoge el coste de los elementos utilizados para el desarrollo e implementación del sistema de control de la pulverización.

Tabla 5. Valoración de los materiales utilizados en el desarrollo del sistema de pulverización. Fuente: Elaboración propia.

DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO UNIDAD	TOTAL
Microcontroladora ELEGOO UNO R3	1	9,99 €	9,99 €
Relés WINGONEER® 5PCS modelo KY-019 5V	12	1,80 €	21,60 €
Electroválvula proporcional marca ARAG, en concreto el modelo 463022S	1	210,00 €	210,00 €
Sensor de presión Seafont	1	14,79 €	14,79 €
Caudalímetro Thingnovation modelo YF-S201	1	5,08 €	5,08 €
Portaboquillas eléctrico ARAG modelo 4064T942.	8	93,75 €	750,00 €
Boquillas Teejet, modelo TTI11002	8	1,12 €	8,96 €
Sensor ultrasonidos DFRobot modelo JSN-SR04T	8	16,46 €	131,68 €
Caja estanca	1	8,30 €	8,30 €
TOTAL PRESUPUESTO			1160,40 €

Con el presupuesto anterior, y si se tiene en cuenta que el vehículo autopropulsado empleado en este proyecto tiene un precio en torno a 22.300 €, el montaje del sistema supone un incremento de tan solo un 5,2%, sobre el precio total del vehículo usado para su acople.

Ahora, si lo que se pretende es comparar el precio del sistema desarrollado con alguno que tenga iguales o similares características, se ha analizado el mercado y buscado que productos cumplen con los requisitos técnicos de este proyecto, se ha encontrado un producto comercial fabricado por la empresa ARAG SRL, Rubiera - Reggio nell'Emilia, Italia, denominado “*Bravo 350 Orchard*”. Este producto únicamente es un computador que realiza las funciones de recepción de datos procedentes de los sensores sonar y envío de ordenes a los distintos actuadores, permitiendo una regulación de volumen en función de la presencia de la vegetación. Su precio estimado es de 2.100 €, a lo que hay que sumar los sensores de ultrasonidos compatibles con el computador, que rondan los 250 € cada uno, las electroválvulas que tienen un valor de unos 250 €/unidad, además de los sensores de presión y caudalímetros. Con lo cual, el presupuesto para montar un sistema de este tipo (más de 4000 € en su conjunto), en un vehículo autopropulsado, supera con creces el que se ha gastado en el presente proyecto.

Visto lo anterior, se deduce que el sistema desarrollado en el presente proyecto cumple uno de los objetivos más importantes que se plantearon a la hora de abordarlo, que no era otro que el económico, se ha cumplido ampliamente, justificando de esta manera y en este sentido el desarrollo del sistema de pulverización planteado.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES TÉCNICAS.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES TÉCNICAS

6.1. CONCLUSIONES.

A la vista de los resultados obtenidos con los ensayos realizados en el laboratorio, y a falta de su ratificación con la realización de ensayos de campo dentro un invernadero (cuando la actual situación sanitaria así lo permita), se concluye que los principales objetivos que se perseguían en el presente proyecto han sido conseguidos, obteniendo así un sistema de control para la aplicación selectiva de fitosanitarios de bajo coste, que es posible su adaptación a equipos pulverizadores autopropulsados utilizados en los invernaderos y que permite, sin perder eficacia en los tratamientos, manteniendo una deposición adecuada en las hojas, un ahorro en el consumo originado principalmente por las menores pérdidas del caldo en el suelo.

El sistema cumple con los principios de la tecnología de aplicación variable de insumos (Variable Rate Technology) ajustada a las necesidades del cultivo.

La evaluación de los sensores usados, así como los actuadores que permiten ambos el control variable de la dosificación, se ha realizado de forma satisfactoria, permitiendo una pulverización adaptada al cultivo (CAS, Crop Adpted Spraying).

Los costes del equipamiento, como también se ha podido constatar, en general son bajos y muy inferiores a los de cualquier otro sistema similar que haya actualmente en el mercado, permitiendo que las explotaciones independientemente de su tamaño puedan incorporarlo a sus equipos de pulverización.

El sistema desarrollado para cultivos de invernadero permite la detección de la presencia o ausencia de masa vegetal y la detección de la densidad de área foliar en las simulaciones de cultivo evaluadas. El rango de detección del sensor de entre 19 y 300 cm es adecuado para la configuración del cultivo utilizado en invernaderos ubicados en el sureste de España, y es capaz de detectar espacios ausentes de plantas mayores de 50 cm con una velocidad hacia adelante de alrededor de $1,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. No se probaron velocidades más lentas porque no son utilizadas por los productores de invernadero que utilizan vehículos autopropulsados.

Este sistema puede resultar en un ahorro de líquido de pulverización de aproximadamente el 22,4% debido a la desactivación de las boquillas de pulverización en ausencia de vegetación a lo largo de las líneas de cultivo. No se constaron ahorros cuando se ensayó con cultivos de distinta densidad de área foliar porque hubo una limitación en la presión del circuito provocada por el funcionamiento de las electroválvulas portaboquillas, que hacía que estas tuvieran dificultades de cierre a presiones superiores a 6 bares; sin embargo, este sistema es un paso adelante de bajo costo en los métodos de pulverización de invernadero.

Por tanto, este desarrollo de control de bajo costo permitiría a los productores aumentar la operatividad, ya que solo tienen que conducir el vehículo; esto reduce las pérdidas de productos y minimiza el impacto ambiental de las aplicaciones de aerosoles de pesticidas, evitando al mismo tiempo un gasto excesivo.

6.2. RECOMENDACIONES TÉCNICAS.

En este apartado se indicarán todas aquellas recomendaciones que desde el punto de vista técnico pueden mejorar el sistema, y por consiguiente los objetivos planteados en el mismo. Esto se traducirá en aplicaciones más eficaces con menores pérdidas en el suelo y con menores riesgos de exposición de los operadores (Sánchez-Hermosilla et al. 2003, 2011, 2012; Nuyttens et al. 2004, 2009).

Así se pueden relacionar las siguientes:

- Mejora de los sensores para la detección de la masa foliar.

Si bien, se ha comprobado que el resultado de los sensores de ultrasonidos usados han dado un resultado bastante bueno a la hora de detectar la vegetación, se podría valorar el uso de sensores LIDAR con un rango de medición pequeño, para que este sea de bajo coste, y mediante el acople de un servomotor se amplíe el ángulo de medición permitiendo realizar medidas al menos en 180° . Con este tipo de tecnología se ganaría en precisión y rapidez a la hora de cuantificar masa foliar, a la vez que se obtiene un mapa real del volumen total de vegetación por hileras dentro del invernadero.

- Introducción de sensores que midan la temperatura.
Como se ha visto a lo largo del presente documento, los sensores de ultrasonidos son sensibles a la temperatura del ambiente, influyendo directamente en la velocidad del sonido y por tanto, con condiciones ambientales diferentes, se obtienen distintos resultados en la medición de la distancia a un mismo obstáculo. Para evitar esto, y como se vio en el apartado 1.6.1, se necesita corregir la velocidad del sonido en función de la temperatura. Pues bien, para que esta corrección sea automática y garantice una mayor precisión de este tipo de sensores, se pueden incorporar al sistema elementos de bajo coste que sean capaces de medir la temperatura de forma continua.
- Incorporación de un acelerómetro.
Un parámetro, que es fundamental a la hora del cálculo de la dosificación de un producto fitosanitario es la velocidad de trabajo, influyendo esta de forma directamente proporcional al volumen empleado, es decir, a mayor velocidad de trabajo mayor debe de ser el volumen suministrado. En este sistema se ha dispuesto una velocidad de trabajo teórica de 1,3 m/s, pero eso llevado a la práctica, es difícil de mantener de forma constante. De ahí que es interesante la incorporación de un acelerómetro (sensor que mide la velocidad de desplazamiento) al sistema que vaya registrando la velocidad de manera continua y el sistema use ese parámetro para los cálculos del volumen (l/ha) necesario en cada momento, consiguiendo así mayor precisión en las dosis aplicadas.
- Mejora en las características técnicas de los sensores y actuadores empleados.
Se ha visto como la presión de trabajo en los ensayos ha sido influenciada por la limitación en las características técnicas de las electroválvulas portaboquillas, provocando que no se pueda trabajar a presiones superiores a 6 bares. Sería recomendable mejorar las características técnicas de aquellos elementos que suponen una restricción en el funcionamiento del sistema, que en nuestro caso, afectaría principalmente a la presión de trabajo, en este sentido, se tendrían que revisar las electroválvulas portaboquillas y el sensor de presión.
- Sustitución de las electroválvulas portaboquillas on/off por electroválvulas proporcionales.
En este proyecto, se ha determinado el volumen de aplicación atendiendo a un PRV calculado en franjas verticales de vegetación, puesto que todas las boquillas de la misma barra que están abiertas se someten a la misma presión y por tanto aplican el mismo caudal. Esto es debido a que las electroválvulas portaboquillas usadas son de accionamiento abierto/cerrado y no permiten regular el caudal que pasa a través de ellas.
Con la sustitución de estas electroválvulas portaboquillas por electroválvulas proporcionales (PWM), se podría aplicar una dosis diferente en cada boquilla en función del cálculo del PRV por franjas horizontales de vegetación, ya que las mayores diferencias de espesor se encuentran entre estas franjas. Esta mejora hay que tratarla con mucho cuidado y buscar en el mercado electroválvulas proporcionales cuyo precio no sea elevado, ya que en caso contrario puede ocurrir que los costes se disparen y pierda el proyecto el objetivo establecido de bajo coste.

BIBLIOGRAFÍA

7. BIBLIOGRAFÍA.

BIBLIOGRAFÍA

- Anon., 2020. *KY-019 5V Relay Module*. [En línea] Available at: <https://arduinomodules.info/ky-019-5v-relay-module/>
- An, X. y otros, 2015. Potential Dermal Exposure and Risk Assessment for Applicator of Chlorothalonil and Chlorpyrifos in cucumber greenhouses in China. *Human and Ecological Risk Assessment*, 21(4), pp. pp.972-985.
- Aragnet, 2021. *ARAG - products*. [En línea] Available at: <https://www.aragnet.com/VediMacro/EN/246/products/?PRD=110279>
- Asaei, H., Jafari, A. & Loghavi, M., 2019. Site-specific orchard sprayer equipped with machine vision for chemical usage management. *Comput. Electron. Agric.*, 162, pp. pp 431-439.
- Balsari, P., Marucco, P. & Tamagnone, M., 2009. A crop identification system (CIS) to optimise pesticide applications in orchards.. *J. Horticult. Sci. Biotechnol. ISAFRUIT Special Issue*, pp. 113-116.
- Balsari, P., Oggero, G., Bozzer, C. & Marucco, P., 2012. An autonomous self-propelled sprayer for safer pesticide application in glasshouses.. *Asp. Appl. Bio.* 114, pp. pp. 197-204.
- Baltazar, M. T. y otros, 2014. Pesticides exposure as etiologial factors of Parkinson's disease and other neurodegenerative diseases--a mechanistic approach.. *Toxicology letters*, 230(2) , p. 85–103.
- Bargen, K., Meyer, G. & Mortensen, D., 1993. Red/near-infrared reflectance sensor system for detecting plants. *Opt. Agric. For. Int. Soc. Opt. Photonics*, 1836, pp. pp 231-239.
- Becerra, A. & Lastra-Bravo, X., 2010. La agricultura intensiva del Poniente Almeriense. Diagnóstico e instrumentos de gestión ambiental.. *M+A, Revista Electrónica de Medio Ambiente-UCM*. 8. , Issue 8, pp. 18-40.
- Bohnenkamp, D., Behmann, J. & Mahlein, A.-K., 2019. In-Field Detection of Yellow Rust in Wheat on the Ground Canopy and UAV Scale.. *Remote Sensing*, 11(21), p. 2495.
- Byers, R., Hickey, K. & Hill, C., 1971. Base gallonage per acre. *Virginia Fruit*, 60 , pp. pp. 19-23.
- Cabello, T., 1996. Utilización de pesticidas en cultivos en invernaderos del sur de España y análisis de riesgos toxicológicos y medio ambientales.. *Phytoma España 1131-8988*, Issue 75, pp. 11-19.
- Canny, J., 1986. A computational approach to edge detection. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 6, pp. pp. 679-698.
- Carretillas Amate, S.L., 2021. *Carretillas Amate*. [En línea] Available at: <https://www.carretillasamate.com/tizona-35/38-tizona-35.html>
- Cerejeira, M. y otros, 2003. Pesticides in Portuguese surface and ground waters,. *Water Research*., 37(5), pp. 1055-1063.
- Dasarathy, B., 1997. Sensor fusion potential exploitation-innovative architectures and illustrative applications. *Proc. IEEE*, 85 (1) , pp. pp 24-38.
- DFRobot, s.f. *Weather - proof Ultrasonic Sensor with Separate Probe SKU SEN0208 wiki*. [En línea] Available at: [https://wiki.dfrobot.com/Weather - proof Ultrasonic Sensor with Separate Probe SKU SEN0208](https://wiki.dfrobot.com/Weather_-_proof_Ultrasonic_Sensor_with_Separate_Probe_SKU_SEN0208)
- Doruchowski, G., Swiechowski, W., Godyn, A. & Holownicki, R., 2011. Automatically controlled sprayer to implement spray drift reducing application strategies in orchards. *J. Fruit Ornam. Plant Res.*, 19, pp. pp 175-182.
- ELEGOO Official, 2021. *ELEGOO: Best Consumer Level 3D Printers, STEM Kits & Robots*. [En línea] Available at: <https://www.elegoo.com/>

- Escolà, A. y otros, July 2013. Variable rate sprayer. Part 1 – Orchard prototype: Design, implementation and validation. *Computers and Electronics in Agriculture*. Vol. 95, pp. Pages 122-135.
- Gil, E. y otros, August 2007. Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors. *Crop Protection Volume 26, Issue 8*, pp. Pages 1287-1297.
- Giles, D., Delwiche, M. & Dodd, R., 1987. Control of orchard spraying based on electronic sensing of target characteristics. *Trans. ASABE*, 30 (1624–1630), p. p. 1936.
- Giles, D., Delwiche, M. & Dodd, R., 1989a. *Method and Apparatus for Target Plant Foliage Sensing and Mapping and Related Materials Application Control*. s.l. Patente nº 4823268.
- Giles, D., Delwiche, M. & Dodd, R., 1989. Sprayer control by sensing orchard crop characteristics: orchard architecture and spray liquid savings. *J. Agric. Eng. Res.*, 43, pp. pp. 271-289.
- Giles, D. K., Klassen, P., Niederholzer, F. J. A. & Downey, D., 2011. Smart sprayer technology provides environmental and economic benefits in California orchards.. *California Agriculture*, Issue 65, p. 85–89.
- Gil, Y. y otros, 2007b. Atmospheric loss of pesticides above an artificial vineyard during air-assisted spraying.. *Atmospheric Environment*, Issue 41, p. 2945–2957.
- Guzmán, J. L., Rodríguez, F., Sánchez-Hermosilla, J. & Berenguel, M., 2008. Robust pressure control in a mobile robot for spraying tasks.. *Trans. Asabe*, 51, pp. pp. 715-727.
- He, X., Zeng, A. & Liu, Y., 2011. Precision orchard sprayer based on automatically infrared target detecting and electrostatic spraying techniques. *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, 4 (1), pp. pp. 35-40.
- Jeon, H. y otros, 2011. Evaluation of ultrasonic sensor for variable-rate spray applications.. *Computers and Electronics in Agriculture* 75,, pp. 213-221.
- Junta de Andalucía, s.f. *Boletín Oficial de la Junta de Andalucía - Histórico del BOJA*. [En línea]
Available at: <https://www.juntadeandalucia.es/boja/2016/86/2>
- Liu, H. y otros, 2012. An electronic flow control system for a variable-rate tree sprayer.. *Proceedings of the 2012 ASABE Annual International Meeting Dallas, USA*..
- Llop, J. y otros, 2105. Spray distribution evaluation of different settings of a hand-held-trolley sprayer used in greenhouse tomato crops.. *Pest Management Science*, 72 (3), pp. pp. 505-516.
- Mahlein, A.-K., 2016. Plant Disease Detection by Imaging Sensors – Parallels and Specific Demands for Precision Agriculture and Plant Phenotyping.. *Plant Disease*, 100(2), pp. 241-251.
- Mahmud, M. S. y otros, 2021. Development of a LiDAR-guided section-based tree canopy density measurement system for precision spray applications. *Computers and Electronics in Agriculture*. Volume 182.
- McKerrow, P. & Neil, H., 2001. Plant acoustic density profile model of ctm ultrasonic sensing.. *IEEE Sensors Journal* 1, pp. 245-255.
- Méndez, V. y otros, 2013. LIDAR simulation in modelled orchards to optimise the use of terrestrial laser scanners and derived vegetative measures.. *Biosystems Engineering* 115, pp. 7-19.
- Ministerio de Agricultura. Pesca y Alimentación, s.f. *Ministerio de Agricultura. Pesca y Alimentación*. [En línea]
Available at: <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/medios-de-produccion/maquinaria-agricola/>
- Moltó, E., Martín, B. & Gutiérrez, A., 2001. Reducción de la pérdida de pesticidas mediante la adaptación automática de la pulverización en árboles globulares. *J. Agrícola. El Ing. Res.*, 78, pp. pp. 35-41.
- Moshou, D. y otros, 2011. Intelligent multi-sensor system for the detection and treatment of fungal diseases in arable crops.. *Biosystems Engineering*, 108(4), pp. 311-321.

- Pawlowski, A. y otros, 2017. A low-cost embedded controller design for selective spraying vehicle. *IFAC-PapersOnLine Volume 50, Issue 1*, pp. Pages 5404-5409.
- Reicbard, D. L. & Ladd, T. L., 1981. An automatic intermittent sprayer.. *Transactions of the ASAE 24 (4)*, pp. pp 893-896.
- Rincón, V. J., Páez, F. C. & Sánchez-Hermosilla, J., 2018. Potential dermal exposure to operators applying pesticide on greenhouse crops using low-cost equipment. *Science of the Total Environment. Volume 630*, pp. Pages 1181-1187.
- Ritter, W., 1990. Pesticide contamination of ground water in the United States--a review.. *Journal of environmental science and health. Part. B, Pesticides, food contaminants, and agricultural wastes, 25(1)*, pp. 1-29.
- Roper, B., 1988. 4768713. s.l. Patente nº 4768713.
- Sánchez-Hermosilla, J., Medina, R. & Gázquez, J., 2003. Improvements in pesticide application in greenhouses. *Revista Cajamar*.
- Sánchez-Hermosilla, J., Páez, F., Rincón, V. J. & José Pérez-Alonso, 2013. Volume application rate adapted to the canopy size in greenhouse tomato crops. *Scientia Agrícola., Volumen 70*, pp. 390-396.
- Sánchez-Hermosilla, J., Rincón, V. P., F., A. F. & Carvajal, 2011. Field evaluation of a self-propelled sprayer and effects of the application rate on spray deposition and losses to the ground in greenhouses tomato crops.. *Pest Management Science, 67 (8)*, pp. pp. 942-947.
- Sánchez-Hermosilla, J., Rincón, V. P. F. & Fernández, 2012. Comparative spray deposits by manually pulled trolley sprayer and a spray gun in greenhouses tomato crops.. *M. Crop Protection, 31 (1)*, pp. pp. 119-124..
- Shalal, N., Low, T. & McCarthy, C., 2015. Orchard mapping and mobile robot localization using on-board camera and laser scanner data fusion – part A: tree detection. *Comput. Electron. Agric., 119 (Supplement C)*, pp. pp 254-266.
- Sivasangari, A., Saraswady, D. & Sasikumar, D., 2015. An autonomous pest detection and pesticide spraying system using image processing and embedded processor. *Aust. J. Basic Appl. Sci., 9 (35)*, pp. pp 38-43.
- Sutton, T. & Unrath, C., 1984. Evaluation of the tree-row volume concept with density adjustments in relation to spray deposition in apple orchards. *Plant Dis, 68 (6)*, pp. pp. 480-484.
- Tian, H. y otros, 2020. Computer vision technology in agricultural automation —A review.. *Information Processing in Agriculture, 7(1)*, pp. 1-19.
- Torrent, X. y otros, 2020. Determination of spray drift and buffer zones in 3D crops using the ISO standard and new LiDAR methodologies. *Science of The Total Environment. Volume 714*.
- Vischetti, C. y otros, 2008. Measures to reduce pesticide spray drift in a small aquatic ecosystem on a vineyard estate.. *A Review Science of The Total Environment 389*.
- Wei, J. & Salyani, M., 2004. Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: phase 1. Prototype development. *Trans. ASAE, 47 (6)*, pp. pp 2101-2107.
- Wei, J. & Salyani, M., 2005. Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: phase 2. Foliage density measurement. *Trans. ASAE, 48 (4)*, pp. pp 1595-1601.

Resumen

En el presente trabajo se ha diseñado y desarrollado un sistema de aplicación selectiva sobre los cultivos hortícolas de invernadero. El sistema está compuesto por elementos de bajo coste, para que sea accesible económicamente a explotaciones de cualquier tamaño.

El principal objetivo de este sistema para la aplicación de productos fitosanitarios y nutricionales es el de mejorar la eficacia química, reducir los costos laborales, minimizar los peligros laborales y reducir el daño ambiental, sobre todo en lo referente a la contaminación de suelos y acuíferos.

Para la consecución de estos objetivos se ha instalado un sistema basado en la medición de la vegetación mediante sensores de ultrasonidos ubicados en el vehículo, de manera que conforme este avanza, calcula en tiempo real y de forma continua el tamaño del dosel, detecta el estado de desarrollo vegetativo de cada una de las plantas, si hay ausencia de vegetación producida por alguna enfermedad, etc... y en función de los parámetros observados por los sensores, actúa sobre las electroválvulas asociadas a cada una de las boquillas para aplicar el volumen de disolución fitosanitaria óptimo.

Abstract

This current dissertation is focus on a selective application system about greenhouse horticultural crops, which has been designed and managed so as to allow his use to farm of all sizes due to the fact that the system is formed of low-cost elements.

Indeed, the main aim of this system is to improve chemical efficiency, reduce labor costs, minimize occupational hazards and decrease environmental damage, especially in relation to soil and aquifer pollution.

Furthermore, in order to ensure the aim, a system has been installed based on the measurement of vegetation using ultrasound sensors located in the vehicle with the purpose of measuring the area of a canopy in real time. Also, it detects the state of vegetative development of each plant and if there is an absence of vegetation produced by some disease, etc. Considering all parameters measured by the sensors, this system acts on the electro valves associated with each of the nozzles to apply the volume of optimal solution phytosanitary.

